

Trabajo de Fin de Grado

## **Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

### **Maquetas didácticas para la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos: análisis comparativo del diseño, la fabricación, el control y el coste**

#### **MEMORIA**

**Autor:** David Ponsa Banús  
**Director:** Enrique Ernesto Zayas Figueras  
**Convocatoria:** Febrero 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

El presente Trabajo Final de Grado tiene dos objetivos principales, el primero es analizar las características constructivas, funcionales y el coste de adquisición de maquetas comercializadas para la enseñanza de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM) y; el segundo es aportar diseños novedosos y de bajo costo de materialización de maquetas funcionales de dos mecanismos básicos como son el cuadrilátero articulado de Grashof y el mecanismo de manivela-biela-pistón, así como proponer el control de su funcionamiento.

Se ha realizado una búsqueda de empresas que comercializan maquetas para la enseñanza de TMM, y se muestra los mecanismos que comercializan y el coste de adquisición en la empresa alemana Gunt e inglesa TecQuipment, únicas que facilitaron dichos datos. El trabajo expone las características estructurales y funcionales de dichos mecanismos y comparativas entre las nuevas maquetas diseñadas y las comercializadas.

El trabajo expone el diseño modular realizado para el cuadrilátero articulado y para el mecanismo de manivela-biela-pistón, aplicando soluciones creativas y factibles de materializar por procesos de impresión 3D y de corte con láser de bajo coste. Los diseños logrados permiten poder configurar todas inversiones cinemáticas de dichos los mismos, utilizando una única bancada. En los mecanismos se exponen además los esquemas de símbolos de cada inversión con la indicación de los parámetros geométricos correspondientes.

Para la modelación de los sólidos y ensambles, así como la generación de la simulación virtual de su funcionamiento, se ha utilizado el programa SolidWorks y un Módulo *Motion*. La esquematización de los mecanismos se realizó con el Adobe Illustrator.

El trabajo expone la propuesta para la motorización y el control del funcionamiento de las maquetas una vez puedan materializarse, utilizando básicamente motores paso a paso, una tarjeta de control BigEasyDriver y una placa Arduino UNO. Mediante el uso del programa Fritzing se muestra el esquema de conexión de dichos elementos. También propone el código a implementar en el controlador, generado con el entorno de desarrollo IDE de Arduino.

Además, se hace la comparativa entre el coste de adquisición de las maquetas comercializadas y el coste de fabricación de las nuevas maquetas, justificándose la opción de autoproducción de las mismas. En el proyecto se ha utilizado el programa BCN3D Cura, para determinar la cantidad de plástico requerido para la impresión de las piezas, parámetro necesario en la determinación de su coste de fabricación.

Por último, se expone el coste del desarrollo del proyecto y una breve explicación del impacto ambiental.

# Sumario

<b>SUMARIO</b>	<b>4</b>
<b>1. PREFACIO</b>	<b>7</b>
1.1. Origen del proyecto .....	7
1.2. Motivación .....	8
1.3. Requerimientos previos.....	8
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Objetivos del proyecto .....	9
2.2. Alcance del proyecto .....	10
<b>3. RECURSOS DIDÁCTICOS PARA LA ENSEÑANZA DE TEORÍA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS</b>	<b>11</b>
3.1. Características constructivas y funcionales de algunas de las maquetas de mecanismos clásicos utilizados en la TMM en la ETSEIB.....	12
3.1.1. Cuadrilátero articulado .....	12
3.1.2. Manivela-biela-pistón .....	15
3.1.3. Mecanismo de retorno rápido .....	17
3.1.4. Cruz de malta.....	18
3.1.5. Leva-palpador .....	20
3.2. Análisis de las características constructivas y funcionales de las maquetas comercializadas.....	22
3.2.1. <i>Mecanismo cuadrilátero articulado comercializado</i> .....	22
3.2.2. <i>Mecanismo manivela-biela-pistón comercializado</i> .....	23
3.2.3. <i>Mecanismo de retorno rápido comercializado</i> .....	25
3.2.4. <i>Mecanismo cruz de malta comercializado</i> .....	26
3.2.5. <i>Mecanismo leva-palpador comercializado</i> .....	27
3.2.6. <i>Productos ofrecidos por Edibon</i> .....	27
3.2.7. <i>Productos de LJ Create</i> .....	28
3.3. Resumen de algunas características de las maquetas comercializadas .....	29
<b>4. DISEÑO MODULAR DE LAS NUEVAS MAQUETAS: CUADRILÁTERO ARTICULADO Y MANIVELA-BIELA-PISTÓN</b>	<b>30</b>
4.1. Diseño modular de la maqueta del mecanismo cuadrilátero articulado.....	30
4.1.1. Maquetas disponibles actualmente y nueva propuesta de maqueta.....	30
4.1.2. Barras extensibles y bancada .....	31
4.1.3. Uniones entre las barras extensibles y la bancada .....	36
4.1.4. Nueva maqueta didáctica del mecanismo cuadrilátero articulado.....	38

4.2.	Diseño modular de la maqueta del mecanismo manivela-biela-pistón .....	46
4.2.1.	Maquetas disponibles actualmente y nueva propuesta de maqueta.....	46
4.2.2.	Elementos principales y bancada.....	46
4.2.3.	Uniones entre los elementos y la bancada .....	49
4.2.4.	Nueva maqueta didáctica del mecanismo manivela-biela-pistón.....	51
<b>5.</b>	<b>MOTORIZACIÓN Y CONTROL .....</b>	<b>58</b>
5.1.	Elección del motor .....	58
5.2.	Controlador.....	59
5.3.	Placa Arduino .....	62
5.4.	Código y control.....	63
5.5.	Verificación del código.....	66
<b>6.</b>	<b>COSTES .....</b>	<b>68</b>
6.1.	Coste de las maquetas comercializadas.....	68
6.2.	Coste de las maquetas autoproducidas .....	69
6.3.	Coste del proyecto.....	72
<b>7.</b>	<b>COMPARATIVA ENTRE MAQUETAS AUTOPRODUCIDAS Y COMERCIALIZADAS .....</b>	<b>74</b>
<b>8.</b>	<b>IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>75</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
	<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>81</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>82</b>



# 1. Prefacio

## 1.1. Origen del proyecto

El presente proyecto surge de una propuesta que hace el tutor, Enrique Zayas Figueras del Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), al autor ante una solicitud de un tema para el desarrollo de un trabajo de fin de grado (TFG). El interés de la temática propuesta, que abarca aspectos tales como el diseño, la fabricación por impresión 3D y el control del funcionamiento de mecanismos y de la aplicación práctica de conocimientos adquiridos y otros a aprender, así como el poder aportar nuevos recursos didácticos para la enseñanza, han constituido la base para desarrollar el mismo.

Este trabajo de fin de grado se enmarca en el ámbito de las máquinas y mecanismos y en particular dentro de la línea denominada “Aportación de recursos para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos” en la que investiga el profesor Enrique Zayas. En esta línea de investigación se han realizado varios trabajos de fin de grado, entre los que se pueden citar: “Recursos virtuales de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos” [1], “Recursos didácticos para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura Teoría de Máquinas y Mecanismos: prototipos virtuales y reales” [2]; “Modelos virtuales de mecanismos de ruedas dentadas de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de la teoría de máquinas y mecanismos” [3] y el más reciente de título “Diseño, fabricación, motorización y control de mecanismos diversos a utilizar como recursos didácticos en las asignaturas teoría de máquinas y mecanismos y proyecto” [4].

El presente trabajo tiene el objetivo de analizar las características constructivas y funcionales, así como el coste económico entre maquetas didácticas comercializadas y maquetas autoproducidas, así como aportar diseños novedosos y de bajo coste de maquetas didácticas funcionales de los mecanismos básicos cuadrilátero articulado de Grashof y manivela-biela-pistón.

## 1.2. Motivación

La motivación personal para la realización de este proyecto se centra en haber cursado la asignatura Proyecto II con el docente Enrique Zayas. En esta asignatura se estudian mecanismos básicos y se emplean los conocimientos adquiridos de distintas materias para poder desarrollar el proyecto.

La aplicación práctica y vinculación de estos conocimientos, como son la expresión gráfica, la programación, la fabricación por impresión 3D y otros conocimientos nuevos como el diseño modular, así como el poder aportar nuevas maquetas como recursos didácticos para la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos, han constituido la motivación para desarrollar dicho trabajo.

## 1.3. Requerimientos previos

Para poder desarrollar el presente trabajo, se establecen unos requerimientos mínimos, que se listan a continuación.

- Tener dominio de la herramienta de trabajo SolidWorks para el diseño y simulación de mecanismos, mediante su módulo *Motion*.
- Tener conocimientos básicos de la tecnología de Impresión 3D, dado que las maquetas diseñadas deberían ser creadas mediante dicha tecnología.
- Tener conocimientos del software Excel, para crear y trabajar con hojas de cálculo que faciliten la realización del cálculo de costes de fabricación y otros.
- Tener nociones de programación con Arduino para el control del funcionamiento de las maquetas diseñadas y/o materializadas.





## 2. Introducción

### 2.1. Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene dos objetivos principales: el primero es analizar las características constructivas, funcionales y el coste de adquisición de maquetas comercializadas para la enseñanza de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos y; el segundo es aportar diseños novedosos y de bajo costo de materialización de maquetas funcionales de dos mecanismos básicos como son el cuadrilátero articulado de Grashof y el mecanismo de manivela-biela-pistón, así como proponer el control de su funcionamiento. Así, aportar nuevos recursos didácticos virtuales a los ya disponibles por profesores de la escuela, que puedan asistir a los alumnos de posteriores promociones a comprender con más facilidad la estructura y el funcionamiento de los mecanismos vistos en la asignatura.

Estos nuevos recursos didácticos se diseñan y simulan mediante SolidWorks, con el principio del diseño modular y considerando que su materialización sea mediante impresión3D por la técnica de Modelado por Deposición Fundida (siglas en inglés FDM) y mediante corte por láser de Metacrilato.

Con el fin de cumplir los objetivos principales antes citados se han fijado los siguientes objetivos específicos:

- Analizar las características constructivas y funcionales de las maquetas comercializadas.
- Determinar coste actual de las maquetas comercializadas.
- Determinar coste de las nuevas maquetas autoproducidas: cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón.
- Diseñar modularmente una maqueta que permita el montaje y funcionamiento de un cuadrilátero articulado de Grashof y de sus cuatro inversiones, en una misma bancada.
- Diseñar modularmente una maqueta que permita el montaje y funcionamiento de un mecanismo manivela-biela-pistón y de sus cuatro inversiones, en una misma bancada.
- Proponer la motorización y el control del funcionamiento de las maquetas diseñadas y fabricadas mediante una placa Arduino.

## 2.2. Alcance del proyecto

En la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM) se utilizan y estudian muchos mecanismos distintos, básicamente mecanismos planos, por lo que en este proyecto se ha decidido centrar el estudio en las maquetas de algunos de los mecanismos más simples y clásicos, normalmente explicados en los programas de dicha asignatura. Los mecanismos que se estudian en este TFG son:

- El cuadrilátero articulado
- El mecanismo manivela-biela-pistón
- El mecanismo de retorno rápido
- El mecanismo cruz de malta (este es el menos común de los clásicos explicados)
- El mecanismo leva-palpador

Por otra parte, dadas las circunstancias actuales debido a la pandemia del Covid 19, se abarcan las fases de diseño, propuesta de fabricación y de control, sin incluir la materialización de los nuevos mecanismos diseñados: cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón.



### **3. Recursos didácticos para la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos**

En la educación es muy importante el uso de recursos didácticos para enriquecer la experiencia en clase y mejorar así la capacidad de aprendizaje de los estudiantes [5]. Este proyecto aborda el estudio de algunos de los recursos didácticos (reales y virtuales) existentes en la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos, impartida en el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales (GETI) de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). Como indica el nombre de la asignatura, en ésta se estudia la estructura y el funcionamiento de distintos mecanismos, básicamente mecanismos planos de barras, de leva-palpador, donde disponer de recursos como maquetas (virtuales y reales) de los mecanismos más simples es de gran ayuda para el proceso de enseñanza y aprendizaje de dicha materia. Estas maquetas desarrollan el papel de soporte para exponer conceptos esenciales y básicos, y constituyen una motivación al captar la atención y el interés de los alumnos, ayudándolos a comprender mejor el funcionamiento de los mecanismos y los elementos que los constituyen, así como ejemplos de su aplicación en la práctica [6].

En el caso de la ETSEIB, el Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM), el cual se encarga de la impartición de la docencia de dicha asignatura, dispone de una gran variedad de maquetas, fundamentalmente fabricadas en madera [7] para complementar las clases de la asignatura, pero aun así es de interés seguir buscando distintas alternativas para mejorar o complementar las distintas maquetas ya existentes o introducir nuevas maquetas no existentes (reales o virtuales), incluso con aspectos novedosos como la inclusión de módulos (que aumentan la flexibilidad de montaje de variantes de un mismo mecanismo [4]) o la propia motorización que facilita ver el funcionamiento de forma autónoma en el mecanismo.

La existencia de universidades o centros docentes que requieren disponer de maquetas didácticas para ayudar a impartir la asignatura TMM y otras esenciales en la formación de ingeniería industrial, hace que exista un mercado centrado en diferentes recursos didácticos, donde entre otros se encuentran las maquetas de varios mecanismos básicos. Es decir que hay empresas que se dedican a comercializar maquetas para el uso didáctico en la enseñanza en Ingeniería Industrial o en la Formación Profesional de la especialidad Mecánica.

Por otro lado, maquetas similares a las comercializadas se podrían desarrollar de forma autónoma, con un menor coste y una rápida disponibilidad utilizando los recursos actualmente disponibles en las universidades y escuelas; como son los programas de modelización de sólidos en 3D (como por ejemplo el SolidWorks) y las máquinas de impresión 3D, que permiten materializar las maquetas o también usando una tecnología más convencional, como lo es el mecanizado de madera y de piezas metálicas (como tornillos y tuercas para la creación de enlaces).

Por lo tanto, resulta interesante estudiar las diferencias estructurales, constructivas, funcionales y de coste económico entre las maquetas que hay disponibles en el mercado y las de fabricación autónoma por la propia escuela, que se proponen en este proyecto.

### 3.1. Características constructivas y funcionales de algunas de las maquetas de mecanismos clásicos utilizados en la TMM en la ETSEIB

En el siguiente apartado, se exponen algunos de los mecanismos que se recogen en diferentes libros de Teoría de Máquinas y Mecanismos [8] [9] y que se consideran mecanismos básicos o esenciales para la enseñanza de dicha materia. Sobre todo, se exponen maquetas de mecanismos que actualmente están disponibles en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). Normalmente, mecanismos autoproducidos por el propio departamento antes citado.

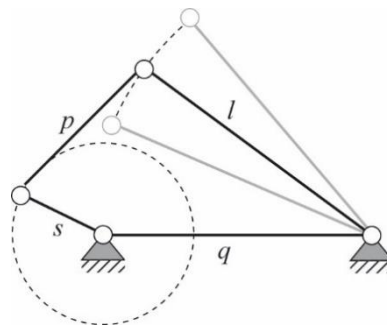
#### 3.1.1. Cuadrilátero articulado

El cuadrilátero articulado o mecanismo de cuatro barras (Figura 1) es un mecanismo básico muy utilizado debido a su simplicidad y a su aplicación práctica en múltiples artefactos, ya que es un mecanismo plano, con un único grado de libertad y está formado por cuatro barras y cuatro articulaciones -tres barras son móviles y una es fija (denominada bancada o bastidor) , y también debido a las posibilidades que brinda para como mecanismo generador de funciones (relación funcional entre el ángulo de la barra de entrada -de longitud  $s$  - y el ángulo de la barra de salida - de longitud  $l$  -) o generador de trayectoria de puntos de la biela (llamadas curvas de acoplador). Cada barra esta una unida con otras dos mediante el uso de articulaciones y según la longitud de las barras se pueden obtener distintas configuraciones, adecuadas para aplicaciones diferentes.

El funcionamiento del mecanismo normalmente viene establecido según la ley de Grashof. Si se considera  $s$  como la longitud de la barra más corta,  $l$  como la longitud de la barra más larga y  $p$  y  $q$  como las longitudes de las otras dos barras, la ley de Grashof nos permite asegurar que si se cumple la siguiente condición (Ecuación 1) la barra de menor longitud,  $s$ , puede dar vueltas enteras alrededor de las otras barras, de modo que posibilita la introducción de un actuador angular que controle el ángulo girado por la barra motriz.

$$s+l \leq p + q \quad (1)$$





*Figura 1: Cuadrilátero articulado con sus dimensiones para ilustrar la ley de Grashof*

En la Figura 2 se muestra la fotografía de una maqueta de dicho mecanismo, construida en madera y con articulaciones materializadas mediante uniones tornillo-tuerca fabricados a medida, disponible en el DEM, tal como se muestra en el sello colocado en la barra de mayor longitud [7].



*Figura 2: Maqueta de madera del mecanismo cuadrilátero articulado de Grashof [7]*

### *Inversiones cinemáticas del mecanismo cuadrilátero articulado*

La inversión de una cadena cinemática es la transformación de un mecanismo en otro por medio de la elección de diferentes miembros de la cadena como elemento fijo a la referencia [6]. En el caso del mecanismo de cuatro barras, este consta de cuatro inversiones cinemáticas, ya que según la barra que se fije se consigue un mecanismo distinto, como por ejemplo un doble balancín o una manivela-biela-balancín. Por lo tanto, interesa que la maqueta que se diseñe tenga la opción de representar todas las inversiones cinemáticas.

En todos los mecanismos obtenidos por inversión de una misma cadena cinemática los movimientos relativos son los mismos. Esto implica que en la ley de Grashof no interviene el orden en que se conectan las barras ni cuál es la barra fija. Si un cuadrilátero articulado cumple la ley de Grashof, la cumple también para sus cuatro inversiones [9].

Las inversiones de un cuadrilátero articulado según el elemento fijo son:

- Si se fija a la referencia el miembro de menor longitud,  $s$ , se obtiene un mecanismo de doble manivela (Figura 3 a), donde todos los miembros darán vueltas enteras.
- Si el miembro que se fija es uno de los miembros contiguos al más corto,  $p$  o  $q$ , se obtiene un mecanismo de manivela-balancín (Figura 3 b) donde la barra más corta será la manivela y la otra el balancín.
- Si el miembro que se fija es el opuesto al más corto,  $l$ , se obtiene un mecanismo de doble balancín (Figura 3 c), donde los miembros articulados a tierra oscilan y el miembro más corto funciona como biela dando vueltas enteras

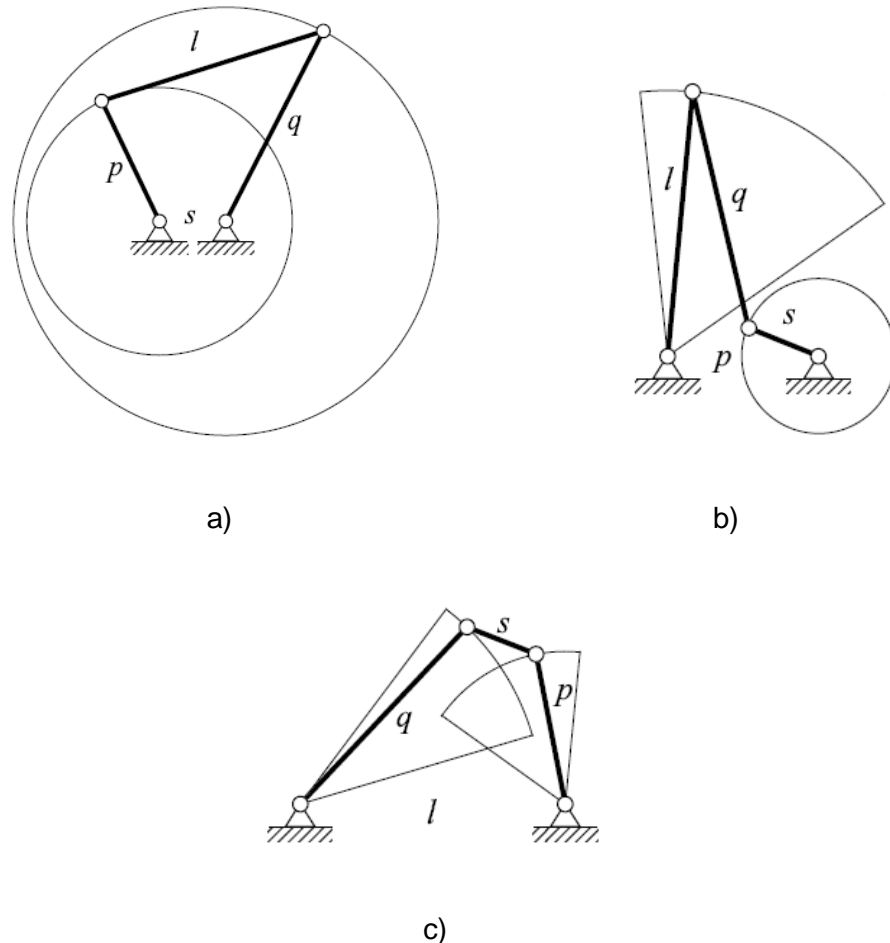


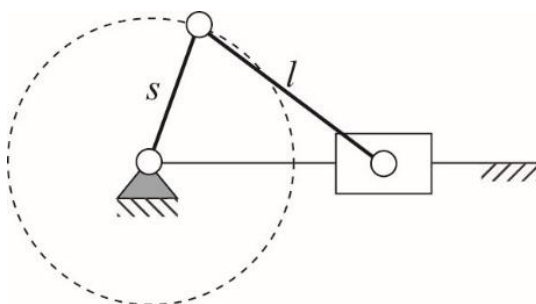
Figura 3: a) Mecanismo de doble manivela, b) Mecanismo de manivela-balancín y c) Mecanismo de doble balancín [9]



La maqueta actualmente disponible en el DEM (Figura 2) es una cadena cinemática (4 barras unidas por enlace de tipo articulación) capaz de representar las inversiones cinemáticas de dicho mecanismo si se fijan manualmente cada una de las barras, comentando que el elemento fijado sería la bancada unida a la referencia tierra (referencia fija). Este hecho motiva al autor a analizar la posibilidad de diseñar una maqueta modular del mecanismo cuadrilátero articulado con capacidad de representar todas las inversiones cinemáticas, utilizando una única bancada reconfigurable.

### 3.1.2. Manivela-biela-pistón

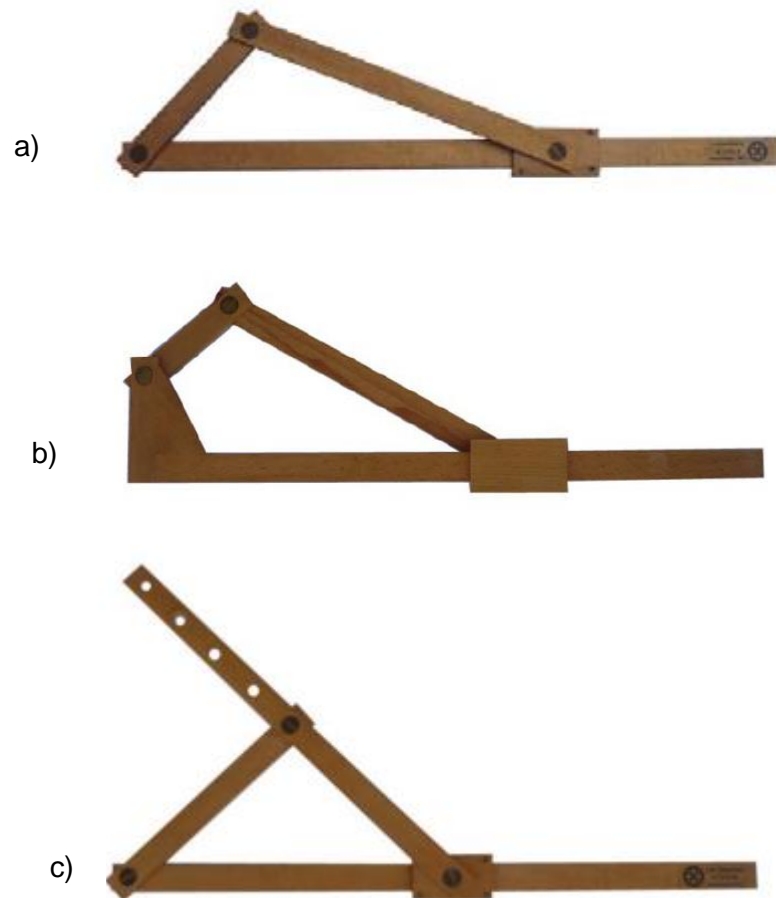
El mecanismo manivela-biela-pistón (Figura 4), es un mecanismo de barras plano con un grado de libertad, formado por 3 elementos móviles: una manivela - de longitud  $s$ , una biela - de longitud  $l$  - y el pistón y, por un elemento fijo, la bancada (elemento rayado en el esquema). La manivela es un elemento que hace rotaciones completas alrededor de un punto fijo en la bancada y el pistón es un elemento que realiza un movimiento de translación alternativa según la dirección impuesta por la guía contenida en la bancada (que puede tener dirección horizontal, vertical e inclinada). Ambos elementos, manivela y pistón, se unen mediante una biela o acoplador con articulaciones en sus extremos.



*Figura 4: Mecanismo manivela-biela-pistón*

Es un mecanismo muy útil ya que tiene la capacidad de transformar un movimiento de rotación en un movimiento de translación o viceversa, de acuerdo con la aplicación práctica donde se utilice (por ejemplo: en un compresor de aire alternativo o en un motor de combustión interna alternativo). Para poder realizar esta transformación de movimientos manivela tiene que ser capaz de dar vueltas enteras, lo que será posible siempre que  $l > s$ .

La proyección de la guía de la corredera puede coincidir con el centro de la articulación fija de la manivela, caso de excentricidad nula, o puede no coincidir con dicha articulación, caso donde se le llama mecanismo de pistón-biela-manivela con excentricidad. Actualmente en el DEM se dispone de 3 maquetas distintas del mecanismo manivela-biela-pistón, la maqueta sin excentricidad (Figura 5 a), la maqueta con excentricidad (Figura 5 b) y una tercera maqueta para estudiar la trayectoria de los puntos de la biela (Figura 5 c).



*Figura 5: Maqueta de madera del mecanismo de manivela-biela-pistón: a) Mecanismo sin excentricidad, b) Mecanismo con excentricidad y c) Mecanismo para estudiar trayectoria de puntos de la biela y variar su longitud [7]*

#### *Inversiones cinemáticas del mecanismo manivela-biela-pistón*

El mecanismo manivela-biela-pistón también tiene cinemáticas cuatro inversiones cinemáticas (tantas como elementos), es decir, según que miembro de la cadena se fije (y por tanto se considera como bancada), se obtiene un mecanismo distinto (Figura 6). Por lo tanto, interesa que la maqueta a diseñar modularmente tenga la opción de modificar el mecanismo para así lograr representar todas las inversiones, al igual que antes a partir de utilizar una única bancada reconfigurable.





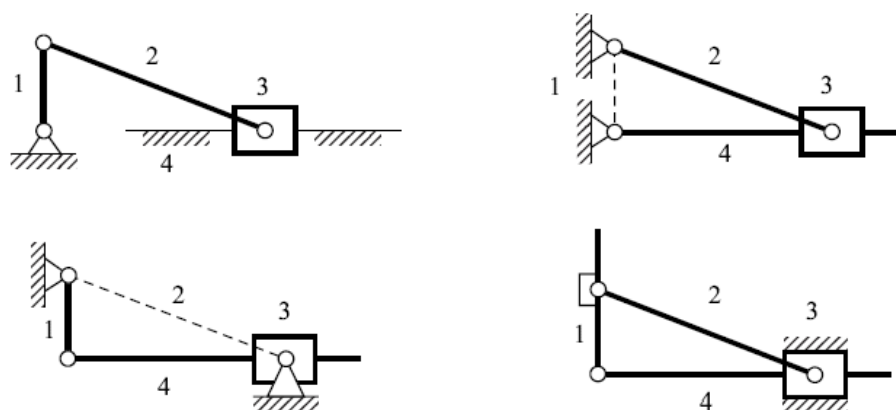


Figura 6: Inversiones cinemáticas del mecanismo manivela-biela-pistón [9]

### 3.1.3. Mecanismo de retorno rápido

Como indica su nombre el mecanismo de retorno rápido (Figura 7) se caracteriza por estar diseñado de forma que éste permita, en su elemento de salida (*corredera 6*) un avance lento en el sentido del recorrido de trabajo y un movimiento rápido en el sentido contrario, es decir en el retorno. La estructura de dicho mecanismo está formada por una manivela (*elemento 2*) que unida mediante una articulación a una corredera (*elemento 3*), convierte su movimiento de rotación en movimiento de translación lineal alternativo sobre una guía móvil (*colisa 4*), articulada a la bancada por su extremo inferior  $O_4$  y articulada a una biela (*elemento 5*) en su extremo superior  $Q$ , transmitiendo a través de esta última el movimiento de translación alternativo del elemento de salida (*corredera 6*).

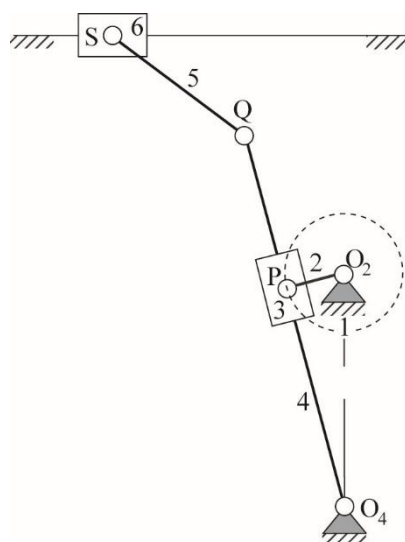


Figura 7: Esquema de un mecanismo de retorno rápido

Cuando la manivela alcanza las configuraciones donde está perpendicular a la barra-guía, son las configuraciones de punto muerto para la coordenada que posicionan al elemento de salida respecto al eje vertical que pasa por  $O_2O_4$ , una corresponde a la posición más lejana de dicho elemento y la otra a su posición inicial o más próxima del elemento respecto al eje vertical  $O_2O_4$ . Cada vuelta completa de la manivela corresponde a un ciclo de trabajo.

Podría ser de interés tener la posibilidad de variar la longitud de la manivela para estudiar así la diferencia entre las velocidades del mecanismo.

En la actualidad, se dispone de una maqueta física motorizada y controlada con Arduino de dicho mecanismo, en una versión convencional y de estructura compleja [2] que es utilizada además de en TMM, en la asignatura Proyecto II (Figura 8 a) y una versión virtual y física diseñada por módulos [10], que facilita su reconfiguración en variantes estructurales distintas de dicho mecanismo (Figura 8 b).



a)



b)

*Figura 8: Mecanismo de retorno rápido de Whitworth: a) Foto de una Maqueta convencional [2] y b) Foto de Maqueta reconfigurable [10]*

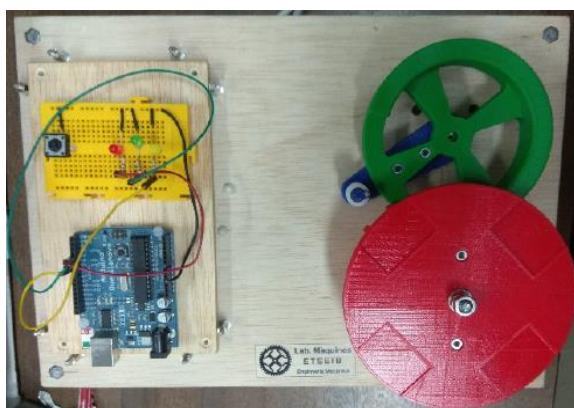
### 3.1.4. Cruz de malta

El mecanismo de Cruz de Malta (Figura 9) destaca por la capacidad de transformar un movimiento rotatorio continuo de una rueda motriz (de radio  $R_m$ ) que a través de un pivote (rodillo que gira en un eje fija a la misma) impulsa a la Cruz de Malta (con ranuras donde entra el pivote) y se convierte en un movimiento rotatorio intermitente de ésta última, que es el elemento de salida de movimiento del mecanismo. Este mecanismo consta de dos partes principales, una rueda motriz que será la que entra el movimiento y por otro lado una pieza en



Diagrama de un mecanismo de engranaje de cremallera. Se muestra un engranaje de cremallera (Cruz de Malta) con centro  $O_2$  y un engranaje de disco (Rueda motriz) con centro  $O_1$ . El engranaje de disco tiene un radio  $R_m$  y un ángulo de giro  $\phi$ . El engranaje de cremallera tiene un radio de rodillo  $R$  y un ángulo de giro  $\theta$ . El punto de contacto entre los engranajes es  $A$ . La distancia entre los centros es  $d$ . El radio del rodillo es  $r_b$ . El punto  $A'$  es el punto de contacto entre el rodillo y el engranaje de cremallera.

En la siguiente Figura 10 se muestra un mecanismo de Cruz de Malta, diseñado, fabricado y motorizado por el profesor Enrique Zayas [12], que actualmente se utiliza como recurso didáctico en la asignatura Proyecto II (P-II) del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (GETI) en la ETSEIB, la que tiene como eje fundamental la materia de Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM).

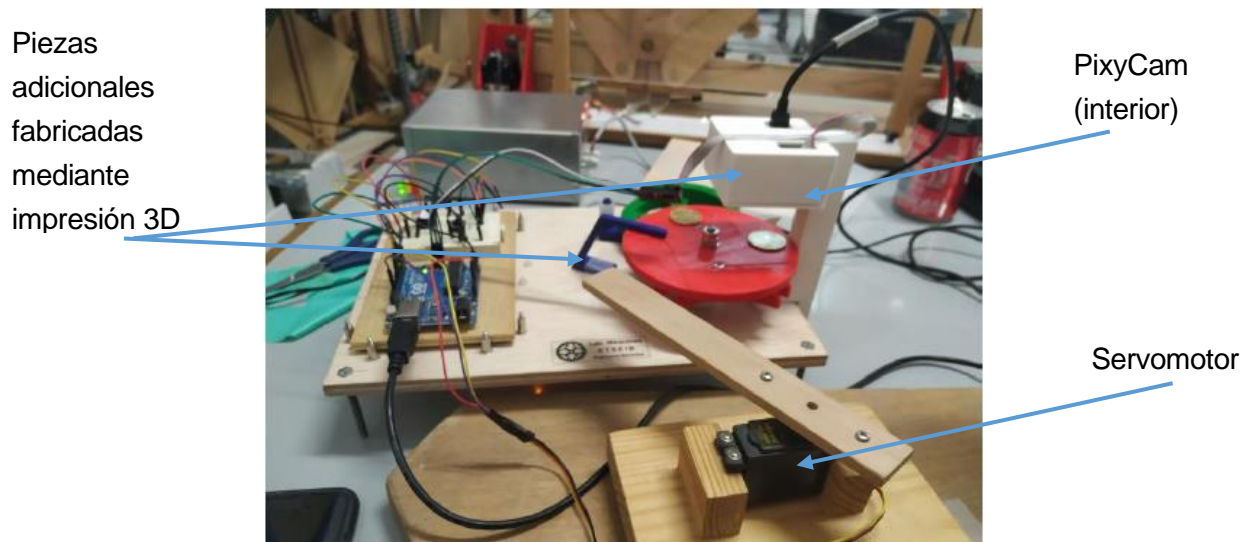


Disponer de maquetas preparadas para controlar su funcionamiento con Arduino facilita la creación de otros mecanismos con diferentes aplicaciones prácticas. El autor del presente TFG, cuando realizó la asignatura Proyecto II antes citada, utilizó y programó el funcionamiento de dicho mecanismo, para una maqueta funcional de un “Dispositivo identificador y clasificador de monedas” (Figura 11) [12].

Este hecho de poder disponer de maquetas funcionales, controladas con Arduino, motivó al autor a continuar con trabajos como el presente TFG, relacionados con el diseño y el control del funcionamiento de mecanismos que el autor considera que constituyen recursos didácticos en la formación y enseñanza de quienes cursan un grado como el GETI.

Añadiendo componentes adicionales al mecanismo ya preparado para su control con Arduino, como un servomotor unido a una barra de madera, elementos diseñados mediante impresión 3D, o la cámara PixyCam, se pueden llegar a conseguir una gran variedad de aplicaciones.

En el Anexo 1 se expone la simulación del funcionamiento del este mecanismo.



*Figura 11: Maqueta funcional de un Dispositivo identificador y clasificador de monedas.*

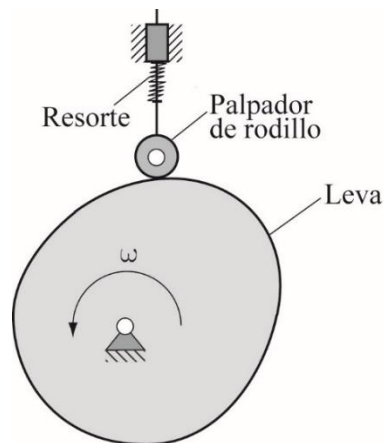
### 3.1.5. Leva-palpador

El mecanismo leva-palpador o leva-seguidor (Figura 12), es un mecanismo normalmente plano y de un grado de libertad que consta de dos elementos móviles (la leva y el palpador) y uno fijo, el bastidor. La leva es el elemento motriz, que normalmente rota respecto a un punto fijo en el bastidor y cuyo perfil variable provoca un movimiento prescrito en palpador (ley de movimiento del palpador). El mecanismo aquí representado es de leva de placa (la más habitual) y palpador de rodillo con movimiento de translación, donde el cierre del par superior



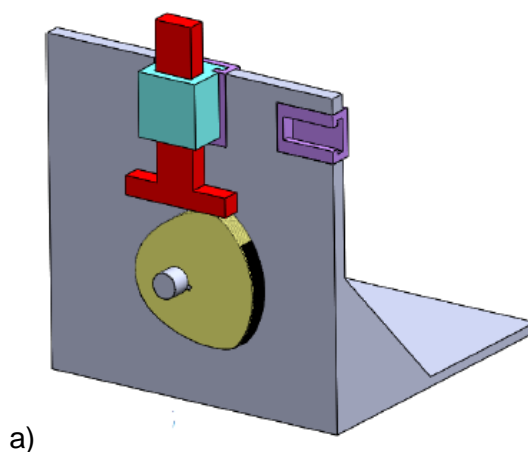
leva-palpador se representa a través de la fuerza introducida por un resorte. Los palpadores más habituales, suelen ser planos o de rodillos con movimientos tanto de translación como de rotación [9].

Al tener un funcionamiento diferente según el perfil de la leva y según el tipo de seguidor, interesa que la maqueta tenga la opción de cambiar la leva para así sustituirla por otra de diferente perfil y que se pueda intercambiar también el tipo de palpador usado.

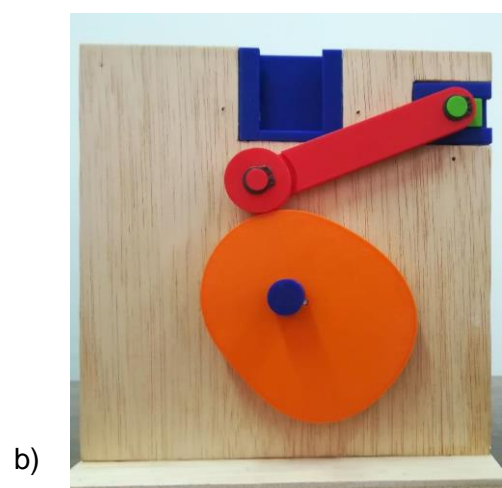


*Figura 12: Mecanismo leva de placa con palpador de rodillo con movimiento de translación [13]*

En la actualidad, se dispone de una maqueta física y virtual de dicho mecanismo (Figura 13), realizada por Aitor Garcia en su TFG [4]. Esta maqueta permite cambiar el tipo de palpador y las diferentes levas con facilidad gracias a su diseño modular y también tiene la capacidad de ser motorizada.



a)



b)

*Figura 13: a) Maqueta virtual del mecanismo leva-palpador y b) Maqueta física del mecanismo leva-palpador [4]*

### 3.2. Análisis de las características constructivas y funcionales de las maquetas comercializadas

Los productos ofrecidos por las empresas Gunt (Alemana) TecQuipment (Inglesa), Edibon (Española) y LJ Create (Inglesa) que comercializan las maquetas para la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM), cumplen la función de soporte didáctico a dicha la asignatura, pero según los fabricantes éstos tienen características constructivas y funcionales distintas. En este apartado se estudian estas características de las maquetas a las que se ha podido tener acceso virtualmente.

#### 3.2.1. Mecanismo cuadrilátero articulado comercializado

A continuación, se describen las características del mecanismo cuadrilátero articulado comercializado por la empresa Gunt (Figura 14). [14]



*Figura 14: Mecanismo cuadrilátero articulado comercializado por Gunt [14]*

El mecanismo está fabricado en su totalidad en aluminio anodizado y el conjunto de elementos es ensamblado en una bancada horizontal, de metacrilato transparente y dos piezas metálicas tubulares que junto a su peso aproximado de 3 kg hacen que sea fácil de transportar. El mecanismo consta de dos discos (articulados a la bancada mediante rodamientos) y dos barras, con sus respectivas uniones articuladas, y es capaz de verificar el criterio de Grashof ya que se puede variar la longitud de la manivela (disco motriz que contiene 3 agujeros alineados dispuestos radialmente) y las longitudes de las dos barras móviles restantes, que también se pueden ajustar al tamaño deseado.

En las especificaciones de esta maqueta en la web [15], se indica que ésta puede funcionar como mecanismo de manivela-balancín, mecanismo de doble balancín y mecanismo de doble





manivela, adecuando las longitudes correspondientes, por lo tanto, se pueden llegar a representar las distintas inversiones cinemáticas de un mecanismo cuadrilátero articulado. No es evidente visualizar, la inversión en la cual la barra de menor longitud es fija.

Por otro lado, la maqueta del mecanismo cuadrilátero articulado también es comercializada por la empresa TecQuipment (Figura 15). [16]



*Figura 15: Mecanismo cuadrilátero articulado comercializado por TecQuipment [16]*

En este caso la maqueta se conforma por dos módulos, la estructura (bancada) y el kit de las barras a articular, que son vendidos por separado. La estructura tiene un panel principal plano, que es una chapa metálica doblada en sus bordes y con múltiples taladros, la que se une a dos soportes triangulares, lo que hace que el peso de solo este elemento sea de 5,1 kg. Por otra parte, el kit ES15 consta de 20 barras de distintas longitudes y de distintas uniones roscadas. Este producto ofrece más libertad para escoger las configuraciones deseadas e igual que en el caso del producto de Gunt, se puede verificar el criterio de Grashof y mostrar todas las inversiones cinemáticas de dicho mecanismo. [17]

El kit de barras y uniones pesa 3,6 kg por lo que el peso total asciende a 8,7 kg lo que hace que la maqueta sea más incómoda de transportar que la ofrecida por Gunt. Es decir, que se entiende que su uso es más adecuado para tenerla en un lugar fijo de un laboratorio.

### *3.2.2. Mecanismo manivela-biela-pistón comercializado*

A continuación, se describen las características del mecanismo manivela-biela-pistón comercializado por la empresa Gunt (Figura 16). [14]



*Figura 16: Mecanismo manivela-biela-pistón comercializado por la empresa Gunt [14]*

El mecanismo también está fabricado en su totalidad en aluminio anodizado y el conjunto de elementos vuelve a estar ensamblado en una bancada horizontal, de metacrilato transparente y dos piezas metálicas tubulares que junto a su peso aproximado de 2 kg hacen que sea fácil de transportar. El mecanismo consta de un disco (articulado a la bancada mediante un rodamiento), una barra que realiza el papel de biela y un cilindro que realiza el papel de pistón. Se puede variar la longitud de la manivela (disco motriz que contiene 3 agujeros alineados dispuestos radialmente) y se puede regular la posición del cilindro, trabajado con un cilindro fijo u oscilante. [18]

Por otro lado, el mecanismo manivela-biela-pistón también es comercializado por la empresa TecQuipment (Figura 17, izquierda). [16]



*Figura 17: Mecanismo de manivela-biela-pistón y de yugo escocés comercializado por TecQuipment [19]*





La maqueta vuelve a estar formada por dos módulos, la estructura (bancada) y el kit de mecanismos simples. La estructura es la misma que se ha descrito en el apartado anterior, pero en este caso el kit es el ES14. Este kit es más completo que la maqueta de Gunt ya que consta de 3 mecanismos distintos, el mecanismo manivela-biela-pistón, el mecanismo yugo escocés (que es mostrado en la fotografía anterior, montado en el panel metálico) y el mecanismo de retorno rápido. Aun así, este producto ofrece menos libertad para escoger las configuraciones deseadas e igual que en el caso del producto de Gunt, ya que no se pueden modificar las longitudes de los elementos que intervienen. [19]

El kit de mecanismos simples pesa 3,5 kg por lo que el peso total asciende a 8,6 kg lo que hace que la maqueta sea más incómoda de transportar que la ofrecida por Gunt. Es decir, que se entiende que su uso es más adecuado para tenerla en un lugar fijo de un laboratorio.

### 3.2.3. *Mecanismo de retorno rápido comercializado*

A continuación, se describen las características del mecanismo de retorno rápido comercializado por la empresa Gunt (Figura 18). [14]



*Figura 18: Mecanismo de retorno rápido comercializado por la empresa Gunt [14]*

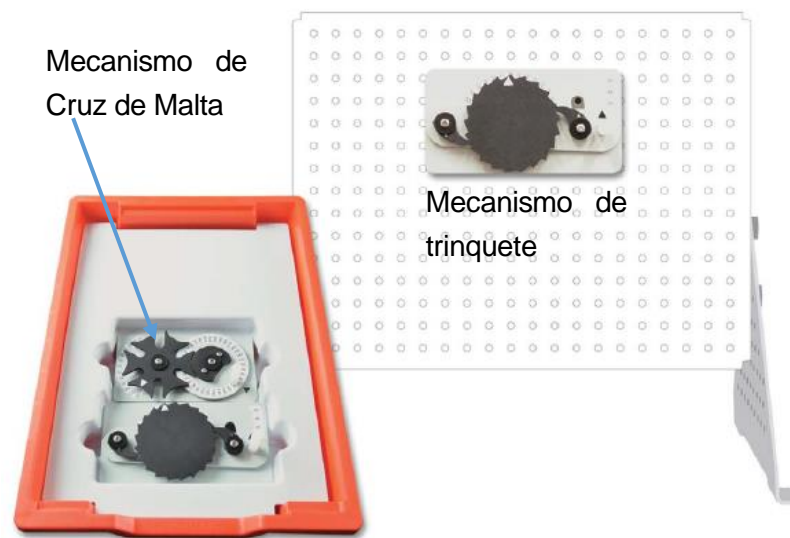
El mecanismo también está fabricado en su totalidad en aluminio anodizado y el conjunto de elementos vuelve a estar ensamblado en una bancada horizontal, de metacrilato transparente y dos piezas metálicas tubulares que junto a su peso aproximado de 2 kg hacen que sea fácil de transportar. El mecanismo consta de un disco (articulado a la bancada mediante

rodamientos), una barra que realiza la función de una biela y el cilindro que es el elemento que experimenta el cambio de velocidad en su retorno. En este mecanismo no se puede variar ningún parámetro como en los anteriores de esta misma empresa. [20]

Por otro lado, el mecanismo de retorno rápido comercializado por la empresa TecQuipment (Figura 17). Visto en el apartado 3.2.2.

#### 3.2.4. Mecanismo cruz de malta comercializado

A continuación, se describen las características del mecanismo cruz de malta comercializado por la empresa TecQuipment (Figura 19, izquierda). [16]



*Figura 19: Mecanismos de Cruz de Malta y de trinquete comercializados por TecQuipment [21]*

La maqueta vuelve a estar formada por dos módulos, la estructura (bancada) y el kit de mecanismos adicionales. La estructura es la misma que se ha descrito en apartados anteriores, pero en este caso el kit es el ES18. Este kit contiene dos mecanismos caracterizados por ser mecanismos de movimiento intermitente. Contiene el mecanismo de Cruz de Malta y el de Trinquete. Este último es un mecanismo que permite el giro de un engranaje en un solo sentido, ya que como se ve en la fotografía en el sentido inverso tiene un par de “uñas” que se encajan en los dientes, deteniendo su movimiento inverso. [21]

El kit de mecanismos adicionales pesa 2,5 kg lo que hace que el peso total sea de 7,6 kg, por lo que se entiende que su uso es más adecuado para tenerla en un lugar fijo de un laboratorio.



### 3.2.5. Mecanismo leva-palpador comercializado

A continuación, se describen las características del mecanismo de leva-palpador comercializado por la empresa TecQuipment (Figura 20). [16]

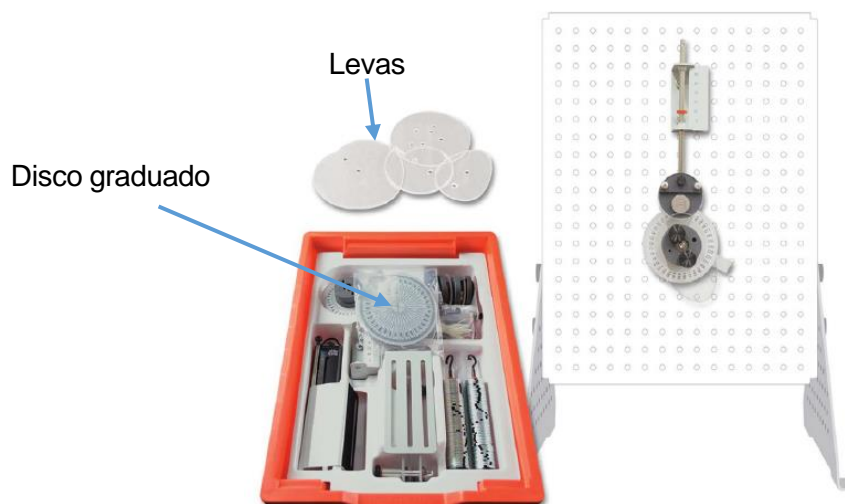


Figura 20: Mecanismo leva-palpador comercializado por TecQuipment [22]

La maqueta vuelve a estar formada por dos módulos, la estructura (bancada) y el kit de mecanismos leva-palpador. La estructura es la misma que se ha descrito en apartados anteriores, pero en este caso el kit es el ES12. Este kit contiene cuatro levas distintas que se pueden intercambiar y también incluye un disco graduado en ángulos y un indicador de posición solidario al vástago del palpador para indicar la variación de su altura a medida que gira la leva. Se puede ajustar el disco graduado y el vástago del palpador sobre el cual se pueden colocar pesos con que garantizan el cierre del par superior en el contacto leva-palpador y también se dispone de un sistema con un dinamómetro convencional (con resorte), que permite ver las fuerzas lineales que actúan sobre el palpador y cuando se gira el disco graduado solidario a la leva. [22]

El kit de mecanismos adicionales pesa 3,4 kg lo que hace que el peso total sea de 8,5 kg, por lo que se entiende que su uso es más adecuado para tenerla en un lugar fijo de un laboratorio.

### 3.2.6. Productos ofrecidos por Edibon

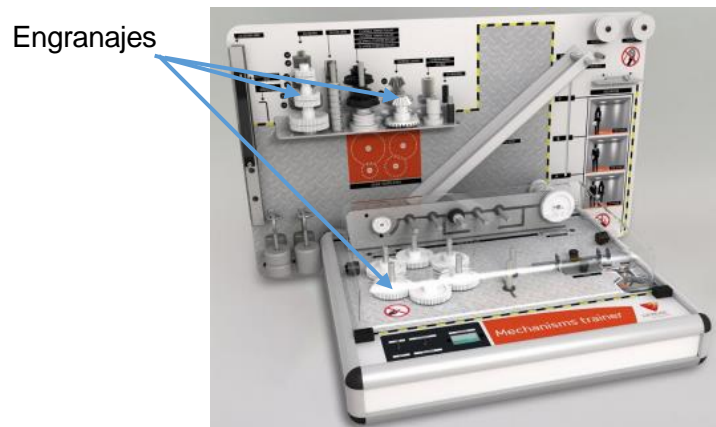
Los productos de Edibon son muy parecidos a los de Gunt tanto en su diseño como en sus especificaciones [23]. Los productos de Edibon también se comercializan las maquetas de forma individual y con su soporte horizontal correspondiente. Los materiales más usados en estos productos son aluminio, para el soporte, y acero, para los distintos miembros que conforman el mecanismo. [24]



*Figura 21: Mecanismo de retorno rápido Whitworth de Edibon [24]*

### 3.2.7. Productos de LJ Create

Por otro lado, en el proceso de búsqueda de maquetas docentes comercializadas también han aparecido los productos ofrecidos por la empresa LJ Create [25]. Entre sus productos no se encuentran la mayoría de las maquetas de interés para el proyecto, pero sin embargo uno de sus productos en forma de KIT sí que podría resultar interesante. El KIT<sup>1</sup> que resulta de interés, según la web correspondiente, permite estudiar cómo el perfil de una leva afecta al movimiento de salida del seguidor (aunque no se identifican fácilmente dichos elementos en la fotografía), a la vez que permite estudiar con más profundidad el funcionamiento de un tren de engranajes (elementos indicados en la fotografía). [26]



*Figura 22: KIT entrenador de mecanismos de LJ Create [26]*

---

<sup>1</sup> KIT 260-01 ES Entrenador de Mecanismos

### **3.3. Resumen de algunas características de las maquetas comercializadas**

Se puede observar que las características de los productos ofrecidos por la empresa Edibon (España) son muy parecidas en cuanto a elementos, estructura y funcionamiento a las de los productos de la empresa Gunt (Alemania). Es decir, son básicamente maquetas de cada tipo de mecanismo comercializadas individualmente.

A diferencia de los anteriores, los productos de TecQuipment (U.K.) se comercializan en forma de kits, incluyendo más de un mecanismo, preparados para ser montados en una bancada compatible para todos los mecanismos. Dicha bancada es comercializada por separado de los kits mencionados.

Por otra parte, los productos ofrecidos por LJ Create (U.K.), al menos los encontrados en la búsqueda en la web, solo cubrirían la necesidad de soporte para la explicación de tren de engranajes y del mecanismo leva-palpador, por lo que las demás maquetas se tendrían que adquirir de alguna de las empresas antes citadas.

## 4. Diseño modular de las nuevas maquetas: cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón

Como se ha comentado anteriormente una de las aportaciones de este proyecto para complementar la amplia colección de maquetas didácticas de las que dispone el DEM, es el rediseño de dos maquetas básicas en la enseñanza de la Teoría de Máquinas y Mecanismos: a) la del mecanismo cuadrilátero articulado y b) la del mecanismo manivela-biela-pistón; añadiendo aspectos novedosos como su diseño modular y una propuesta de control de su funcionamiento mediante la placa Arduino. Además, los diseños se proponen con la previsión de que puedan ser materializados en el futuro próximo, mediante impresión 3D y corte con láser.

En este Capítulo se muestran todos los puntos clave del diseño utilizados para desarrollar las nuevas propuestas de maquetas.

### 4.1. Diseño modular de la maqueta del mecanismo cuadrilátero articulado

#### 4.1.1. Maquetas disponibles actualmente y nueva propuesta de maqueta

Una de las maquetas que se ha considerado que sería de interés diseñar modularmente es el mecanismo de un cuadrilátero articulado. Actualmente, en el DEM se dispone de maquetas de madera de los mecanismos cuadrilátero articulado y paralelogramo articulado (Figura 2 y Figura 23) – *variante del cuadrilátero de lados opuestos con igual longitud*-. Sin embargo, en este proyecto se plantea un nuevo prototipo que se distingue de los ya existentes, ya que se trata de una propuesta de maqueta con diseño modular con la capacidad de representar ambos mecanismos en una sola maqueta juntamente con la capacidad de mostrar las 4 inversiones del mecanismo cuadrilátero articulado de Grashof en una única bancada.



Figura 23: Maqueta de madera del mecanismo paralelogramo articulado [7]

La capacidad de representar las distintas inversiones de Grashof utilizando una única



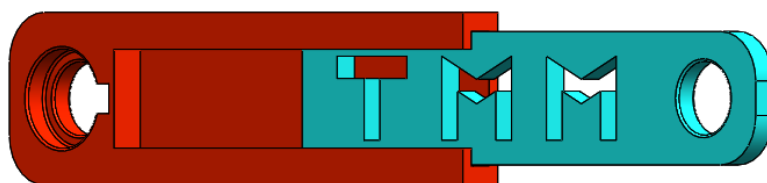
bancada reconfigurable, de forma que sea sencillo pasar de una a otra, junto a la posibilidad de motorizar y controlar el funcionamiento de la maqueta mediante Arduino, se considera que podría ayudar a los docentes en la explicación de los conceptos asociados a este tipo de mecanismos y a los alumnos en su comprensión.

Este nuevo diseño pretende contribuir al DEM con un nuevo modelo virtual (y la simulación de su funcionamiento) y dejando margen a una posible implementación física de la maqueta mediante el uso de tecnologías de impresión 3D. Se ha decidido basar el diseño de la nueva maqueta en esta metodología de fabricación ya que el DEM dispone de este tipo de impresoras y por lo tanto los costes de obtención de estas piezas se reducen a tan solo el material empleado.

Es por eso por lo que se ha utilizado la herramienta CAD SolidWorks (SW) para diseñar las piezas que conformen el nuevo prototipo y también su módulo *Motion* para la simulación de su funcionamiento. Dicha herramienta CAD permite crear piezas con la geometría que se desee y tiene la capacidad de guardar los diseños en formato “.stl”, el cual es requerido para el software de capeado como el programa “BCN3D Cura”, a partir de cual establecer los parámetros de impresión 3D, y a partir de él generar el código G, que requieren las impresoras 3D, para el control de su funcionamiento.

#### 4.1.2. Barras extensibles y bancada

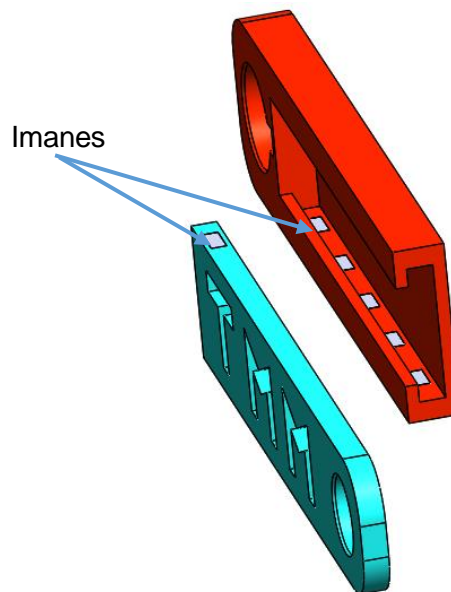
Para cumplir los requerimientos mencionados, la maqueta tiene que permitir la variación de las longitudes de las 4 barras, las 3 barras móviles y la barra fija a la referencia, es decir que dichos sólidos sean reconfigurables. Con ese objetivo en mente, para las barras móviles se han diseñado barras extensibles telescópicas formadas por dos elementos, el primero contiene una guía en forma de C y el segundo (aquí denominado extensión), se desliza dentro de la guía y queda fijo en distintas posiciones según 5 posibilidades preestablecidas de longitudes de barra en función de la inversión que se quiera representar.



*Figura 24: Barra móvil formada por la guía en color rojo y la extensión en color azul*



Las longitudes de barras (sólidos guía y extensión fijos entre sí) que este sistema es capaz de representar son las siguientes: 130,150,170,190 y 210 mm respectivamente. Para fijar la unión entre las dos piezas (guía y extensión) en estas distintas posiciones se ha diseñado un sistema basado en imanes de neodimio (de gran potencia magnética con pequeñas dimensiones), de modo que tanto la guía como la extensión contienen ranuras donde se alojan estos imanes. Esta unión permite modificar las longitudes de las barras con seguridad y también asegurar el correcto funcionamiento del mecanismo ya que en principio evita la posibilidad de que la unión guía-extensión se suelte, conservando la barra la longitud deseada por el usuario. En concreto los imanes de tamaño 7x3x2 mm que se han seleccionado resisten 8,73 N de fuerza de sujeción. [27]



*Figura 25: Unión con imanes entre las piezas que conforman las barras móviles*

El diseño de barras como las utilizadas en este mecanismo favorece a la fabricación, ya que el diseño es el mismo para las 3 barras móviles, y al tratarse de barras telescópicas no es necesario tanto rango de impresión. Por otro lado, como se puede observar el elemento “extensión” se ha diseñado para que al ser impreso queden grabadas las letras TMM, este diseño tiene dos objetivos, el primero indicar que es un mecanismo de la asignatura TMM y el segundo, es reducir el coste de material a la hora de ser impreso, sin afectar por ello la rigidez del elemento.

Para el diseño de los ensambles móviles, utilizados en las barras de longitud variables que constituyen al cuadrilátero articulado, se ha partido de garantizar un ajuste móvil entre el elemento que se ha denominado guía y el que se ha denominado extensión, teniendo en cuenta la tolerancia de fabricación que puede garantizar una impresora 3D de fabricación por filamento fundido (FFF), considerando una tolerancia de  $\pm 0,2\text{mm}$ .





Así, el autor ha establecido un juego mínimo  $J_{\min}=100\ \mu\text{m}$  y un juego máximo  $J_{\max}=400\ \mu\text{m}$ , de modo que considerando una dimensión nominal de anchura de las barras guía y extensión de 27 mm, y partiendo de elegir un sistema de tolerancias Agujero Base (de manera análoga a como se haría si se construyesen con metales, pero sin considerar la influencia de la temperatura en los ajustes). Así, a continuación, se representa el ajuste dado y se realizan los cálculos correspondientes para obtener los intervalos de tolerancias normalizados para ambas piezas y la zona de tolerancia del eje que han de garantizar los juegos antes citados:

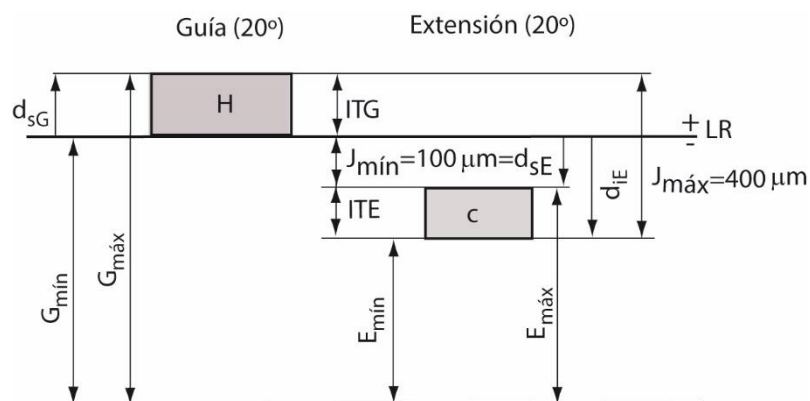


Figura 26: Esquema del ajuste con juego entre guía y extensión

$$J_{\max} - J_{\min} = ITG + ITE = 300\ \mu\text{m} \quad (2)$$

Por tabla 2.1 de Metrología [28], los valores de Intervalos de tolerancias normalizados consecutivos para una dimensión nominal de 27 mm que se pueden elegir si sobrepasar las 300  $\mu\text{m}$  es de 130, así:

$$ITG + ITE = 130\ \mu\text{m} + 130\ \mu\text{m} = 260\ \mu\text{m} < 300\ \mu\text{m} \quad (3)$$

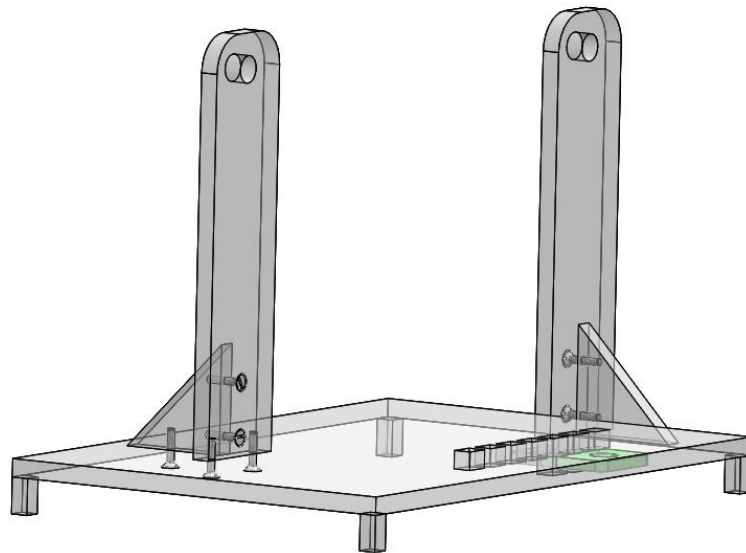
Por tanto, se prevé que la guía (pieza agujero) y la extensión (pieza eje), han de fabricarse con la misma amplitud de tolerancia de 130  $\mu\text{m}$  (0,13 mm), que corresponde, para una dimensión nominal de 27 mm, a una calidad IT11. Y como la desviación superior del eje ( $d_{sE}$ ) = -100  $\mu\text{m}$ , la zona de tolerancia que se le puede asignar según la tabla 2.3 de Metrología [28], es la zona "c", tal como se indica en la representación del ajuste anterior, si bien, habría que normalizar dicha desviación a ( $d_{sE}$ ) = -110  $\mu\text{m}$ .

De modo que el ajuste móvil, que se propone para el enlace guía-extensión tiene denominación ISO 27H11c11.

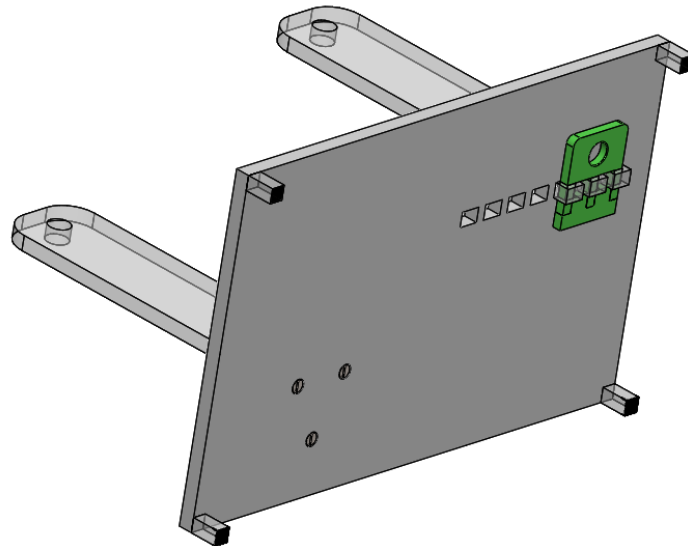
De aquí que las dimensiones máximas de la guía, que en principio, con una máquina impresora 3D de alta precisión de impresión, podría ser de 27,13mm. Si bien, en nuestro diseño, previendo la precisión de la máquina BCN3D Delta, hemos propuesto  $G_{\max} = 27,2\text{mm}$ . Para el caso de la dimensión mínima del eje (extensión) sería de 26,89 mm, si bien,

por la misma razón antes expuesta, hemos previsto  $E_{mín} = 27\text{mm}$ . Es difícil, predecir con mucha precisión en el caso de impresión de piezas por FFF.

Por otra parte, para conseguir variar la longitud de la barra fija se ha diseñado una bancada con capacidad para modificar la posición de uno de sus anclajes (o soporte vertical) con el mecanismo, tal como se ve en las figuras siguientes (Figura 27 y 28).



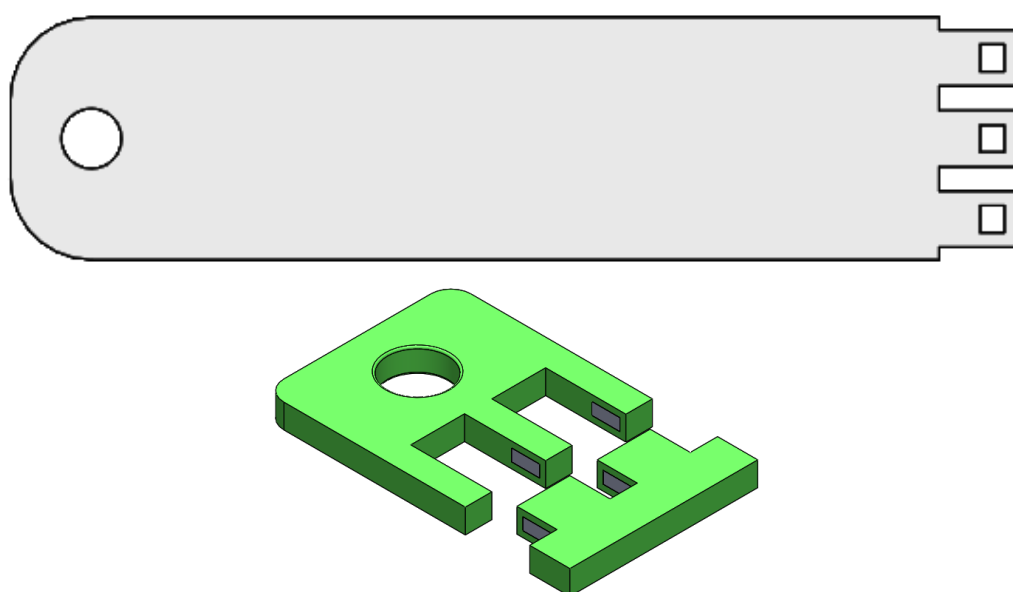
*Figura 27: Bancada del mecanismo cuadrilátero articulado*



*Figura 28: Parte inferior de la bancada con el sistema de fijación en color verde*

La base soporte consiste en una placa de metacrilato que tendrá disposición horizontal, con 4 patas en sus esquinas, y dos columnas soportes con agujeros, también de metacrilato, colocadas verticalmente. Para asegurar la estabilidad y evitar deslizamientos de la maqueta cuando funcione apoyada en distintas superficies (por ejemplo, la mesa del profesor), es necesario incorporar a las patas unas piezas de goma o unas pegatinas antideslizantes en sus extremos. Las placas de metacrilato verticales están en contacto con la placa horizontal por un extremo y a las barras móviles del mecanismo por el otro (donde se acoplarán formando articulaciones).

A las placas verticales se les han incorporado unos cartabones para garantizar su perpendicularidad con la base horizontal. La columna vertical que está en contacto con el motor y con la manivela está fijada al soporte mediante el uso de tornillos de métrica 4 de 20 mm de longitud (M4x0,7 mm de paso), mientras que para la otra placa vertical se ha diseñado un sistema de fijación, por interferencia, que permita cambiar la posición de anclaje con la placa horizontal, modificando así la distancia entre las columnas verticales, que equivale a modificar la longitud de la barra fija del mecanismo según se requiera. Las patas se unen a la base horizontal mediante tornillos iguales a los ya mencionados.



*Figura 29: Pieza de metacrilato móvil y sistema de fijación*

Este sistema consiste en que los salientes de la pieza vertical encajen en las ranuras de la placa horizontal realizadas también empleando corte con láser, y que esta unión quede fijada mediante otras dos piezas que actúan como pasador, Figura 29. Estas piezas se unen entre ellas con imanes del mismo tipo que los usados para las barras y aseguran que el soporte vertical se mantenga en contacto con el horizontal.

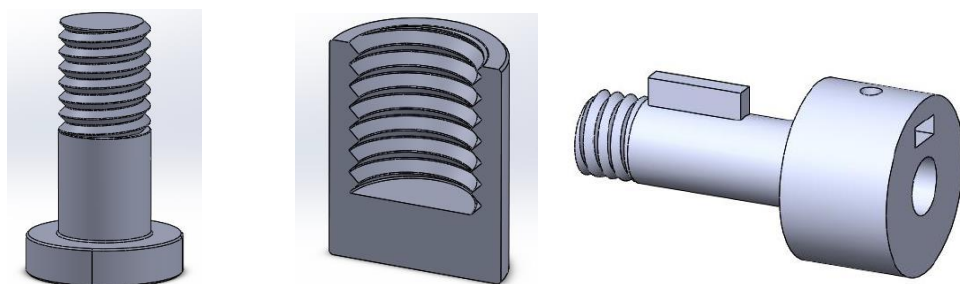
Resulta interesante comentar que previamente se había planteado diseñar el mecanismo sobre una bancada como la que incorpora el mecanismo de barras de TecQuipment, Figura 15. Esta opción se ha terminado descartando e implantando la bancada actual puesto a que conseguir que las piezas se movieran adecuadamente, sin colisionar en las distintas inversiones, suponía la realización de una maqueta más grande y compleja.

#### 4.1.3. Uniones entre las barras extensibles y la bancada

Una vez diseñadas las barras y la bancada, se puede proceder al diseño de los elementos restantes. En el diseño del mecanismo de un cuadrilátero articulado se requiere el uso de distintos tipos de uniones entre las barras. La barra que desarrolla la función de manivela necesita una unión que permita transmitir el par de un motor en uno de sus extremos, mientras que para las demás barras solo requieren de articulaciones de giro libre entre los elementos unidos.

En este proyecto se ha querido aprovechar algunos diseños de piezas realizados en trabajos de fin de grado anteriores en los que también se han diseñado maquetas con impresión 3D y con diseño modular, hasta tal punto que la mayoría las uniones que aparecen en el diseño de la nueva maqueta se han obtenido a partir de piezas que aparecen en el proyecto de Aitor Garcia. [4]

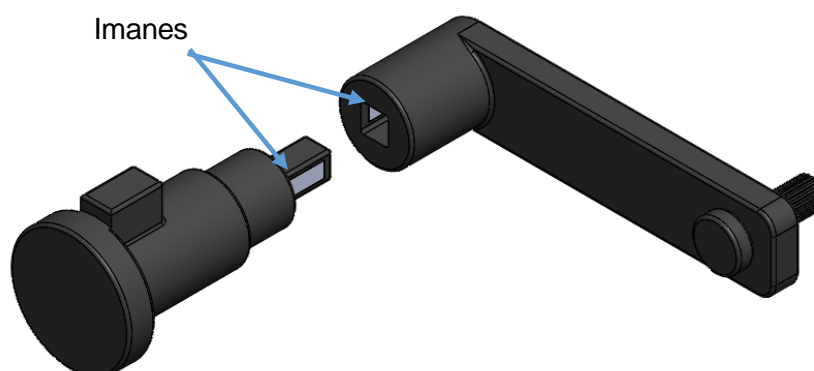
Las piezas que se han aprovechado, del trabajo mencionado, han sido los tornillos con sus respectivas tuercas, que se usan como articulaciones entre las barras. También se ha decidido utilizar otra pieza que para transmitir el movimiento del motor a la barra motriz del mecanismo (Figura 30). Esta pieza puede transmitir el giro del motor a una de las barras y también permite ser reemplazada con facilidad lo que hace que sea fácil de intercambiar por un actuador manual (Figura 31).



*Figura 30: Tornillo, tuerca y elemento que transmite el giro del motor a la manivela de Aitor Garcia [4]*

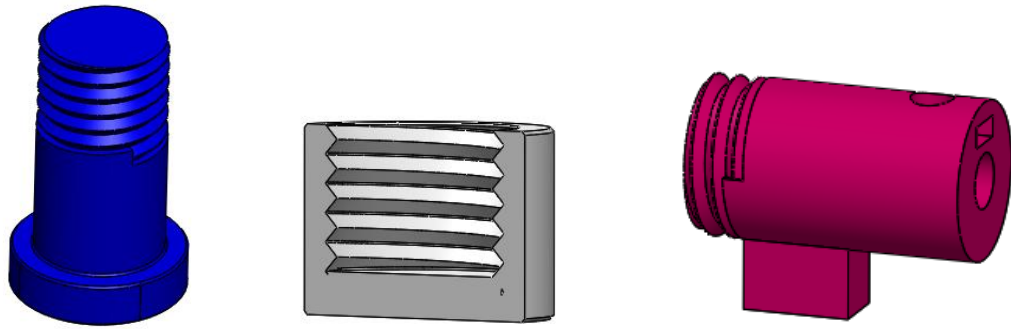
Esta última pieza consta de un sistema capaz de generar una transmisión de par en el extremo donde se coloca el motor. Este sistema se basa en un cilindro con una ranura axial y un agujero circular transversal. La ranura axial es utilizada para albergar una tuerca y el agujero circular para albergar un tronillo sin cabeza (prisionero). De este modo, se puede apretar el tornillo contra el eje y hacer que cilindro y eje giren solidarios, cuando se acciona el motor. Para el otro extremo de la pieza, el que está en contacto con la manivela, se ha utilizado una chaveta para transmitir el par a la barra motriz y el sistema tornillo-tuerca para que dicha barra no se desplace axialmente.

El actuador manual se ha diseñado de forma que sea fácil de montar y desmontar en la bancada. Consta de dos partes principales que se unen mediante un eje y una ranura de perfil cuadrado, con imanes de neodimio (los mismos que para las barras telescópicas) que se encargan de mantener unidas ambas piezas. La pieza que se encuentra en la parte izquierda de la Figura 31, está en contacto con la manivela del mecanismo y es capaz de transmitir el par entre el actuador manual y dicha manivela. Por otro lado, la pieza de la derecha es la que está en contacto con la persona que acciona y controla el mecanismo mediante este accionamiento manual.



*Figura 31: Piezas del sistema para el accionamiento manual del mecanismo*

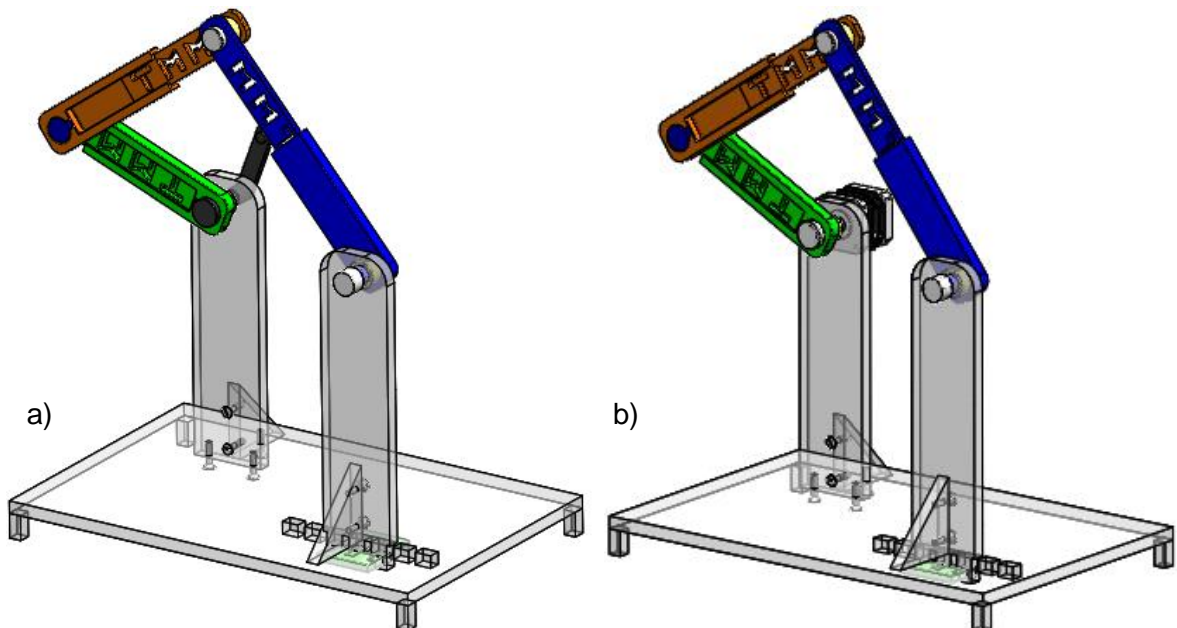
Las longitudes y diámetros de las piezas ya aprovechadas han sido modificados para ajustarse a la nueva maqueta. También se han añadido separadores para que todos los elementos se coloquen en planos paralelos distintos y no exista la posibilidad de colisión en ninguna de las inversiones. En la siguiente imagen (Figura 32), se pueden observar los tornillos, tuercas y el elemento que transmite el par después de las modificaciones realizadas. Los separadores contienen una ranura que permite montarlos en el mecanismo después de colocar el motor y el elemento que transmite el par.



*Figura 32: Tornillo, tuerca y elemento que transmite el giro del motor a la manivela modificados*

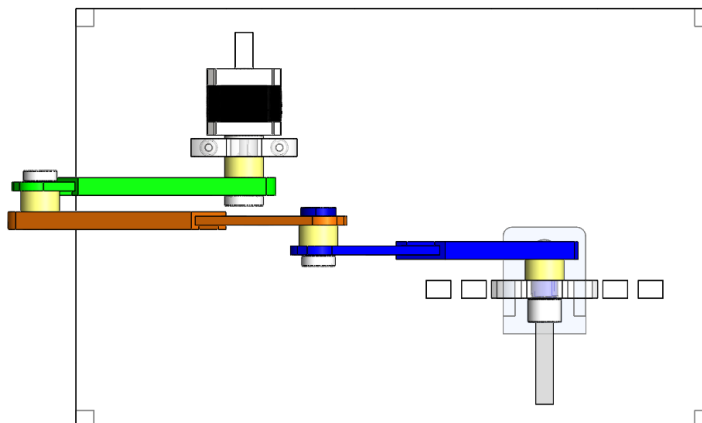
#### 4.1.4. Nueva maqueta didáctica del mecanismo cuadrilátero articulado

Al ensamblar todos los componentes mencionados anteriormente se obtiene la nueva maqueta del cuadrilátero articulado (Figura 33). El mecanismo resultante es capaz de representar todas las inversiones cinemáticas utilizando una única bancada, modificando las longitudes de las barras y es capaz también de configurar el mecanismo paralelogramo articulado (como caso particular del cuadrilátero) como se ve más adelante.



*Figura 33: Vista 3D de la nueva maqueta didáctica del mecanismo cuadrilátero articulado: a) Con actuador manual y b) Con motor paso a paso*

En la Figura 34, se muestra la vista en planta del diseño 3D de la maqueta motorizada, donde se ve la distribución en planos paralelos tenida en cuenta para evitar la colisión de los elementos del mecanismo durante el funcionamiento.



*Figura 34: Vista en planta del mecanismo cuadrilátero articulado*

Como se observa en las figuras anteriores las barras tienen colores distintos, este hecho facilita la explicación del docente y la comprensión de los alumnos ya que es fácil utilizar estos colores para explicar la función que desarrolla cada barra e identificar cada uno de los elementos (manivela, biela y balancín). Por ejemplo, en la configuración anterior (Figura 33) la barra verde trabaja como una manivela, la naranja como una biela y la azul como un balancín.

La relación entre color y elementos viene dada por un código de colores previamente establecido. Se pretende que en la colección digital de modelos virtuales de mecanismos, que se han desarrollado en los distintos trabajos dirigidos por el profesor Enrique Zayas, se utilice un código de colores único, por lo que se ha aprovechado el código que utilizaron Daniel Merino y Carlos Horas en sus trabajos y que Aitor García complementó [4].

A continuación, se muestran las vistas en alzado de las distintas inversiones del mecanismo y la indicación del esquema de símbolo superpuesto sobre el mecanismo, así como el esquema de símbolos individual con la indicación de los parámetros geométricos correspondientes a cada inversión. Es importante comentar que se ha implementado el código de colores antes descrito en la primera inversión del mecanismo (manivela-biela-balancín). Sin embargo, dado que se plantean todas las inversiones con barras de longitudes ajustables, no se han modificado los colores de dichas barras en el resto de las inversiones.

A continuación, en la Figura 35, se expone la vista en alzado de la primera inversión del cuadrilátero articulado que da lugar a un mecanismo de manivela-biela-balancín, que cumple con el criterio de Grashof.

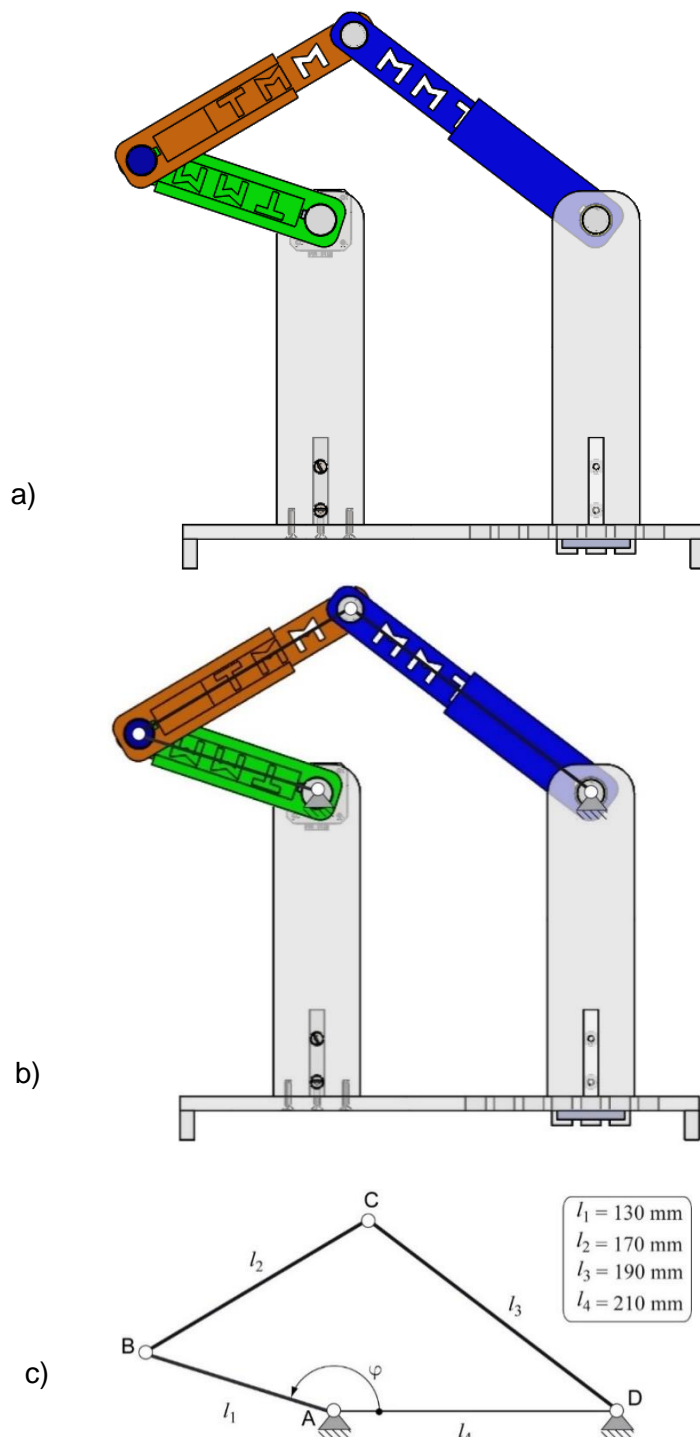


Figura 35: a) Primera Inversión del cuadrilátero: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros





A continuación, en la Figura 36, se expone la vista en alzado de la segunda inversión del cuadrilátero articulado que da lugar a un mecanismo de manivela-biela-balancín, que cumple con el criterio de Grashof.

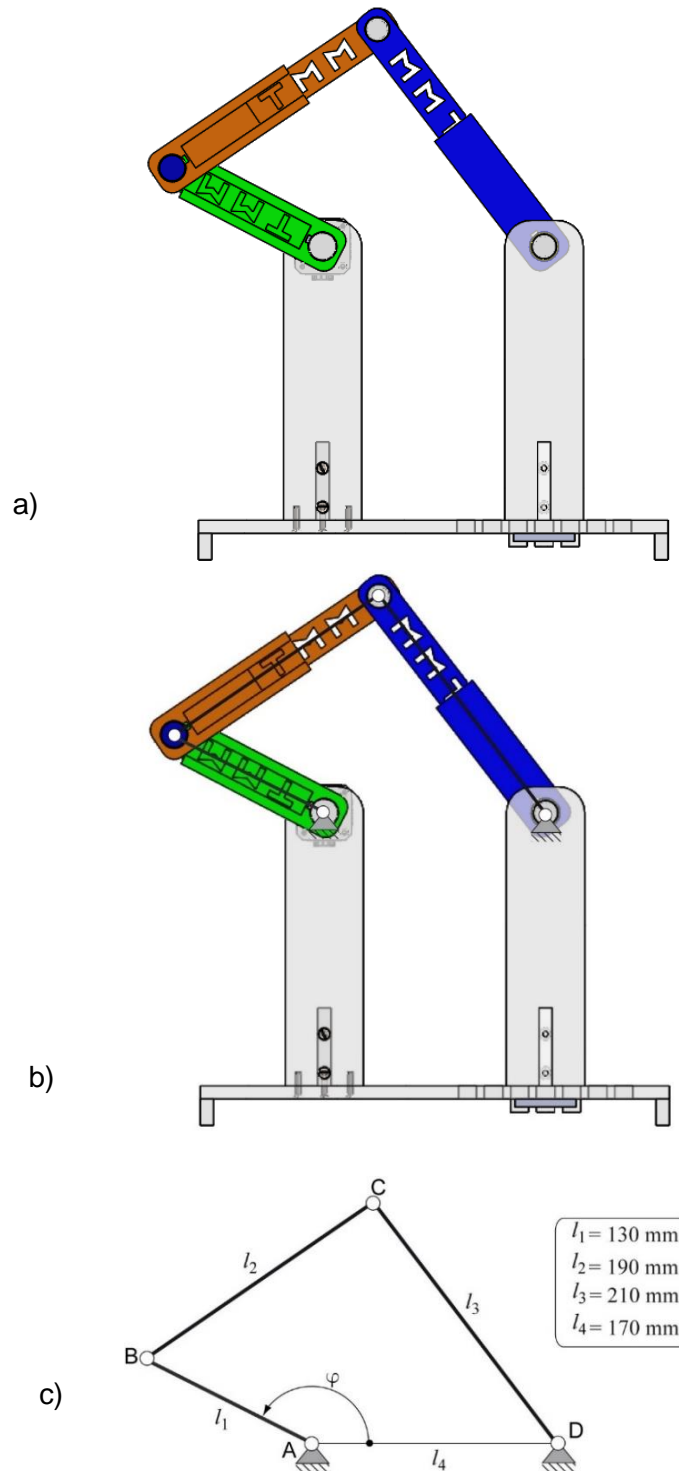


Figura 36: Segunda inversión del cuadrilátero: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros

A continuación, en la Figura 37, se expone la vista en alzado de la tercera inversión del cuadrilátero articulado que da lugar a un mecanismo de doble balancín, que cumple con el criterio de Grashof.

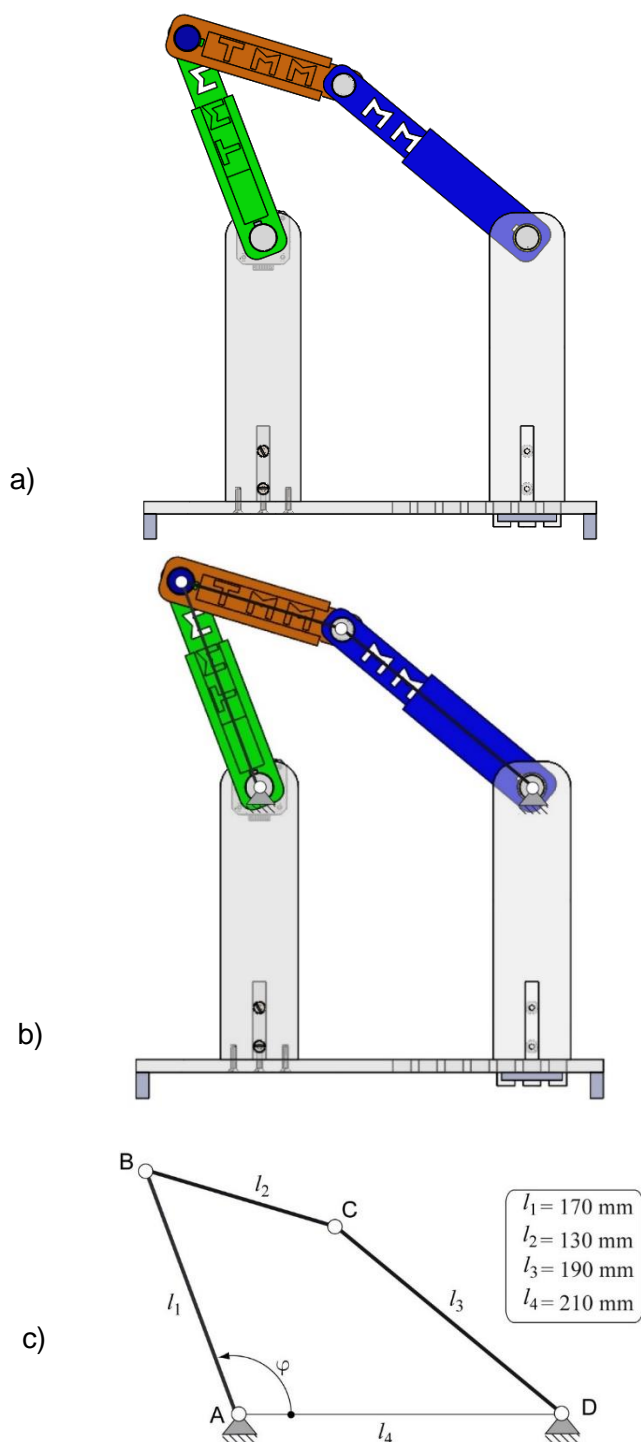


Figura 37: Tercera inversión del cuadrilátero: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros



A continuación, en la Figura 38, se expone la vista en alzado de la cuarta inversión del cuadrilátero articulado que da lugar a un mecanismo de doble manivela, que cumple con el criterio de Grashof.

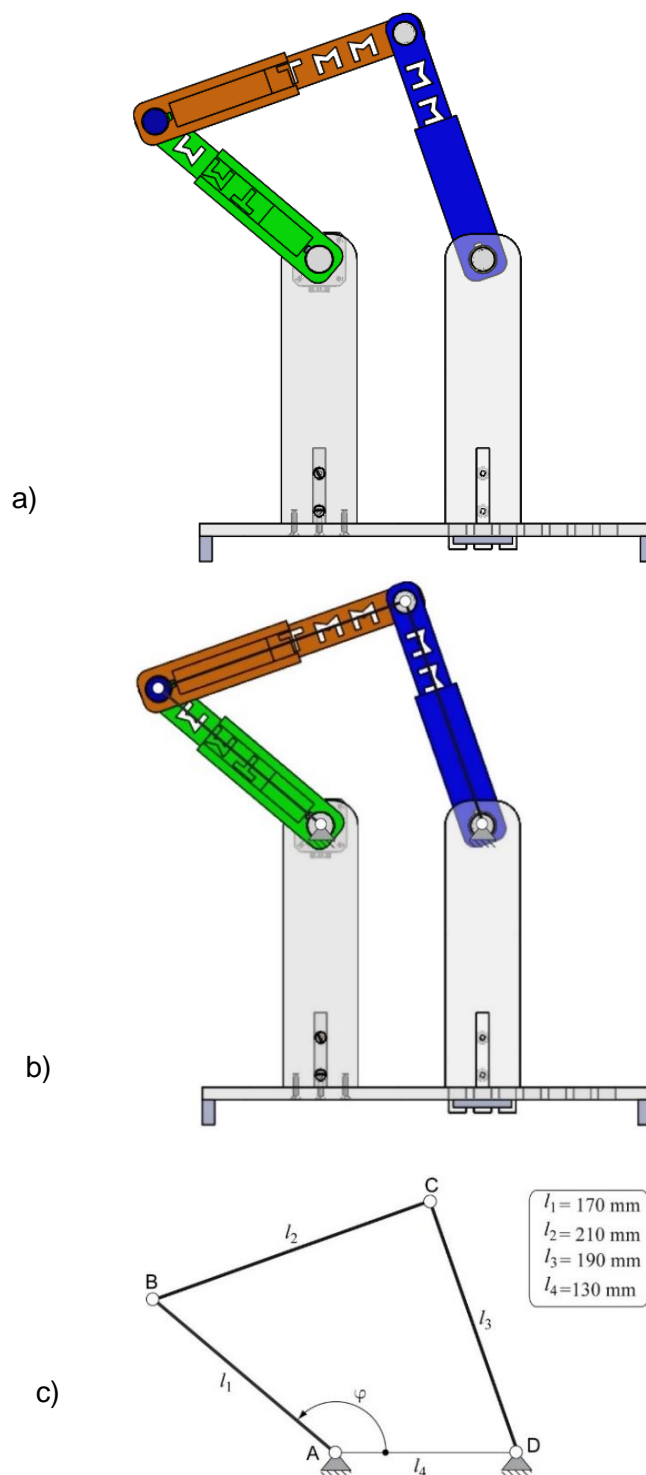


Figura 38: Cuarta inversión del cuadrilátero: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros

A continuación, en la Figura 39, se expone la vista en alzado de la del cuadrilátero articulado que da lugar a un mecanismo de paralelogramo articulado (barras opuestas de igual longitud), que cumple con el criterio de Grashof.

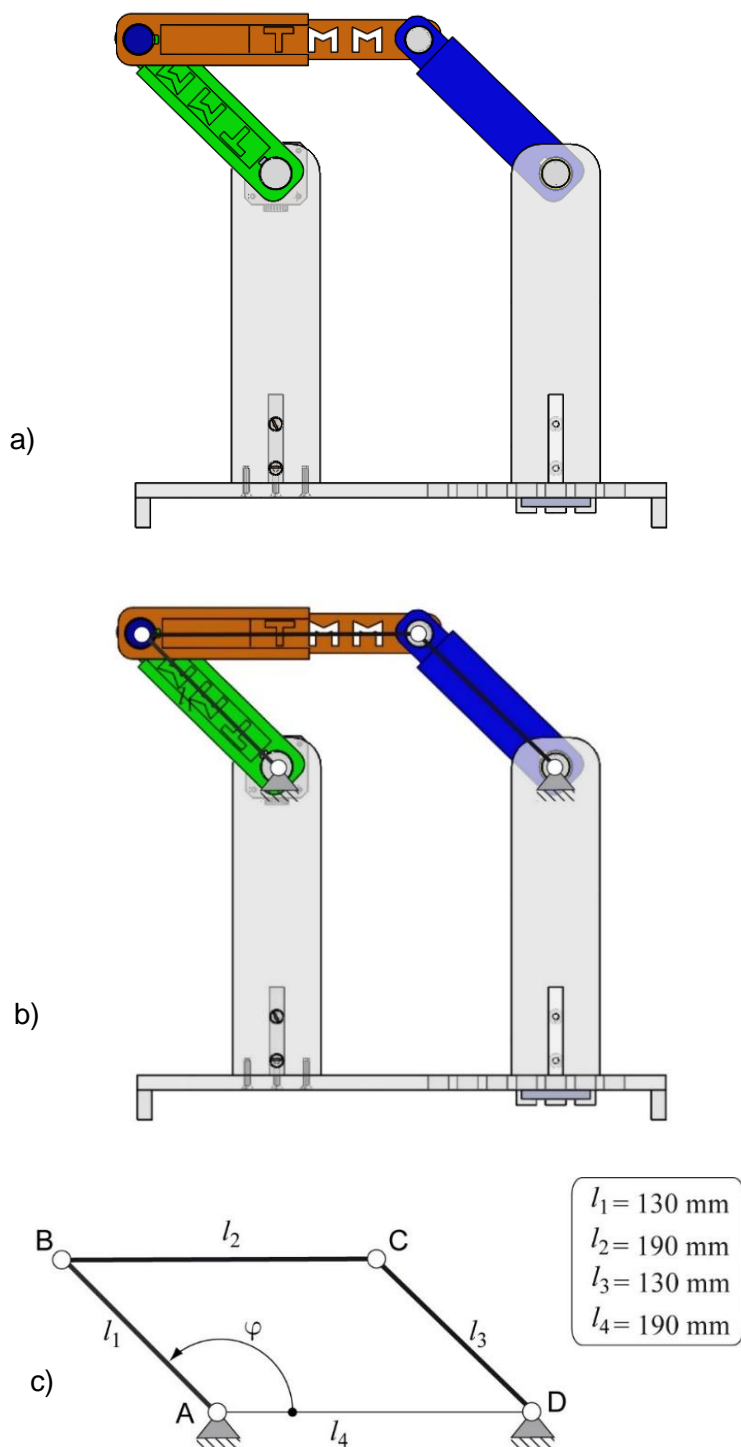


Figura 39: Paralelogramo articulado de Grashof: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros



En todas las inversiones cinemáticas del mecanismo se cumple el criterio de Grashof:  $s+l \leq p+q$ .

Si se sustituyen los valores de longitud de las barras de las 4 inversiones del mecanismo cuadrilátero articulado (Figura 35, 36, 37 y 38) a la expresión de Grashof (1), se obtiene:

$$130+210 \leq 170 + 190 \rightarrow 340 \leq 360 \quad (4)$$

Cumpliendo así el criterio de Grashof, se puede asegurar que el elemento de longitud 130 mm (más corto) es capaz de dar vueltas enteras alrededor de las otras barras. La variación de longitud de las barras permite configurar las inversiones del mecanismo de forma que se cumpla dicho criterio también con una relación de igualdad, consiguiendo así bifurcaciones. Para el funcionamiento de la maqueta mediante el uso del motor paso a paso interesa que no existan bifurcaciones, pero se permite lograr esta configuración con bifurcaciones para ayudar al docente en la explicación de este concepto.

Por otra parte, si se sustituyen los valores de longitud de las barras del mecanismo paralelogramo articulado (Figura 39) a la expresión de Grashof (1), se obtiene:

$$130+190 \leq 130 + 190 \rightarrow 320 \leq 320 \quad (5)$$

Cumpliendo también el criterio de Grashof, pero en este caso con una relación de igualdad, hecho que implica que en el mecanismo aparecen bifurcaciones, es decir, comportamiento indeseado en cierta configuración de su funcionamiento.

Una vez realizados los ensamblajes de las distintas inversiones cinemáticas, para complementar el modelo virtual, se procede a la creación de una simulación del funcionamiento de dicho modelo, que se guarda en el formato de vídeo *.mp4*. El objetivo de estas simulaciones es ayudar al estudiante a comprender con más claridad el funcionamiento de los mecanismos obtenidos

Para la realización de estas simulaciones y posterior exportación a video se ha utilizado el paquete *SolidWorks Motion* del que dispone la herramienta SolidWorks.

Todas las piezas diseñadas para el mecanismo expuesto constan de redondeos de 0,5 mm, evitando aristas vivas, favoreciendo así su impresión 3D.

En el Anexo 5 se incluyen los planos de algunas de las piezas diseñadas.

## **4.2. Diseño modular de la maqueta del mecanismo manivela-biela-pistón**

Otra de las aportaciones de este proyecto es el diseño modular de la maqueta del mecanismo manivela-biela-pistón para lograr configurar las inversiones cinemáticas utilizando una misma bancada y, además hacer una propuesta de control con Arduino.

En este apartado se muestran todos los puntos clave del diseño utilizados para desarrollar la nueva propuesta de maqueta.

### **4.2.1. Maquetas disponibles actualmente y nueva propuesta de maqueta**

Actualmente, en el DEM se dispone de maquetas de madera del mecanismo manivela-biela-pistón comentadas en el apartado 3.1.2. A diferencia de las maquetas ya disponibles, en este proyecto se plantea un nuevo prototipo de maqueta que se distingue por su diseño modular y que tiene la capacidad de representar las 4 inversiones cinemáticas del mecanismo utilizando una única bancada.

Igual que en el diseño de la maqueta del cuadrilátero articulado, la capacidad de mostrar el distinto funcionamiento del mecanismo utilizando una única bancada, de forma que sea fácil cambiar entre las configuraciones de las distintas inversiones, se considera que puede ayudar a la explicación y comprensión de estos conceptos por parte de los estudiantes.

Aquí se aporta un modelo virtual de la maqueta manivela-biela-pistón que dejar abierta la posibilidad de una posterior implementación física mediante impresión 3D.

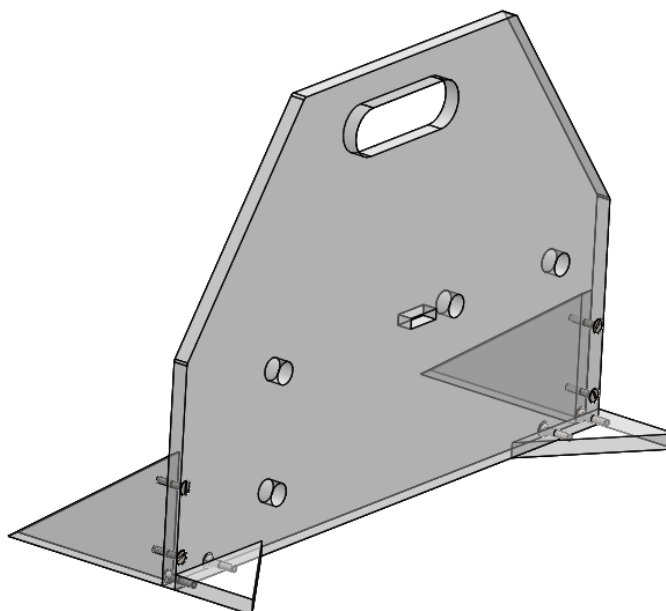
### **4.2.2. Elementos principales y bancada**

Lograr representar todas las inversiones cinemáticas en este mecanismo, ha constituido una búsqueda de soluciones más difíciles de implementar que en el mecanismo de un cuadrilátero articulado.

Como se ve en el apartado 4.1, en el mecanismo cuadrilátero articulado se consigue cambiar el elemento fijo a la referencia (bancada) tan solo modificando las longitudes de las barras ya que los elementos que conforman el mecanismo son barras de distintas longitudes. Sin embargo, en el mecanismo manivela-biela-pistón los elementos que lo constituyen son dos barras (manivela y biela), una guía y una corredera, por lo que es necesario fijar los elementos a la bancada utilizando otros sistemas.



Con esta finalidad, se ha diseñado una bancada con capacidad para fijar los distintos elementos que permiten configurar las distintas inversiones. Los agujeros de la pared vertical (Figura 40) permiten fijar tanto las barras como la guía, empleando tornillos y tuercas, mientras que la ranura rectangular permite fijar la corredera empleando un sistema que incluye piezas adicionales. Este sistema se detalla en el apartado 4.2.3.

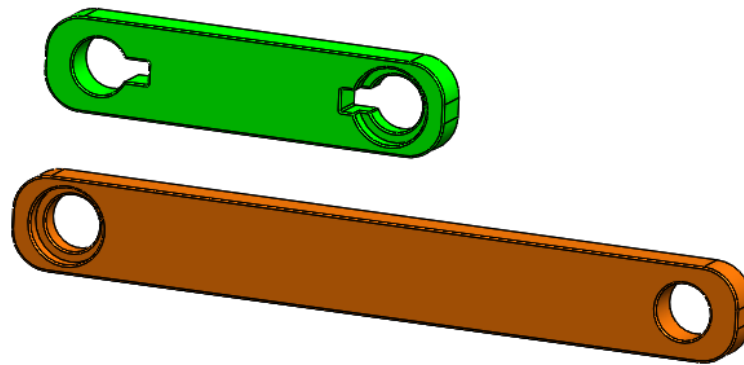


*Figura 40: Vista 3D de la bancada del mecanismo manivela-biela-pistón*

Como se observa en la imagen anterior (Figura 40), la bancada consta de un soporte o pared vertical con unos cartabones en la parte delantera y trasera, permiten asegurar perpendicularidad respecto la superficie donde se apoya la maqueta y que la bancada vuelque debido al peso de los elementos que se incorporen en ella. Esta bancada está diseñada de modo que con una única placa de metacrilato de tamaño DIN A3 y empleando corte con láser se puedan obtener todas las partes que la conforman, es decir, el soporte vertical y todos los cartabones. Para fijar los cartabones se emplean tornillos de métrica M4 con avellanado, de forma que la cabeza del tornillo queda escondida en el metacrilato, y así evitar la posibilidad de contactos indeseados entre los elementos del mecanismo y estos tornillos.

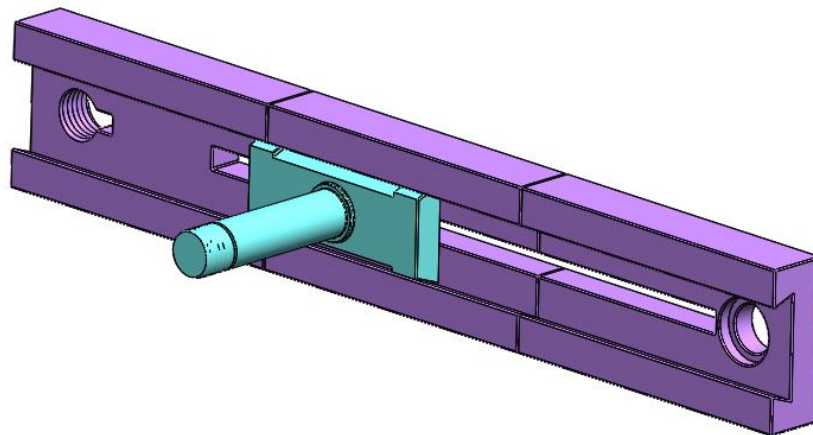
La bancada también contiene una ranura más grande, en la parte superior, pensada para que sea fácil de agarrar con la mano y por lo tanto, fácil de transportar por parte del docente.

El mecanismo, como su nombre indica, está formado por una manivela, una biela y un pistón que tiene que ser representados en la maqueta didáctica. Tanto la manivela como la biela se representan mediante barras de sección rectangular de longitud fija, 80 mm para la manivela y 170 mm para la biela respectivamente y con espesor de 10mm (Figura 41).



*Figura 41: Manivela de color verde y biela de color naranja*

El pistón se representa mediante una corredera con sección de cola de milano. De igual manera, la guía tiene la misma geometría, garantizando que el ensamblaje de dichos elementos facilite el desplazamiento con la menor dificultad, para que el pistón deslice y no se acúñe. Estos elementos han sido heredados del diseño de Carlos Horas [2]. Estos elementos disponen de una geometría funcional probada en otras maquetas que ya se han fabricado empleando también impresión 3D y aunque las piezas han sido modificadas, estos cambios no afectan a su movilidad (Figura 42).



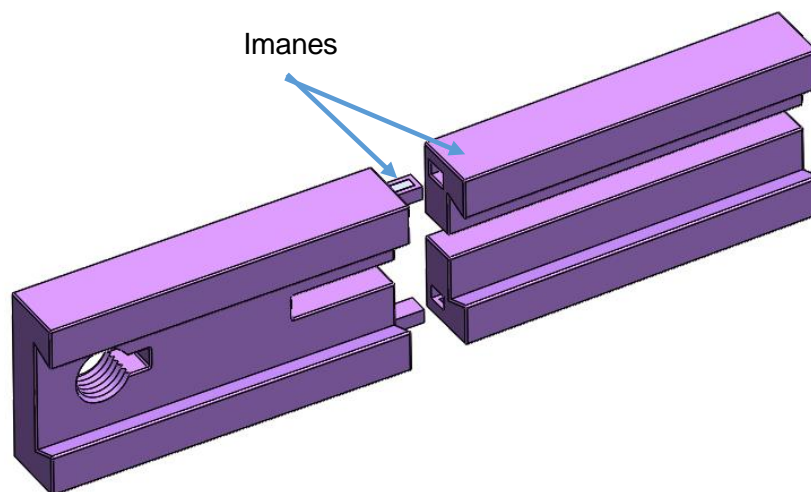
*Figura 42: Guía y corredera con sección de cola de milano*

Los cambios realizados a la corredera son la variación de longitud y diámetro del eje y una ranura en la parte interior que permita fijarla a la bancada con el sistema que se detalla en el apartado 4.2.3. La finalidad de los cambios en el eje de la corredera es que se pueda usar la misma corredera para las distintas inversiones, respetando siempre que los elementos trabajen en planos paralelos.

Por otro lado, la guía se ha creado en 3 partes de igual longitud para facilitar la impresión 3D, puesto que en una única impresión no se podría realizar una guía de 315mm, con la máquina



disponible en el DEM. También se han añadido unos agujeros que permiten fijar la guía a la bancada mediante el uso de tornillos y tuercas fabricados también en impresión 3D, como los del mecanismo de cuatro barras, dejando escondida la cabeza del tornillo para que esta no colisione con la corredera. Para terminar, se ha realizado una ranura a la guía que permite el movimiento cuando la corredera se fija a la bancada y se han realizado unas uniones con imanes de neodimio entre las partes de la guía para que sea fácil de montar y desmontar (Figura 43).



*Figura 43: Unión con imanes entre las partes de la guía*

En otros mecanismos donde se ha usado la guía no ha sido necesario pensar en cómo unir las diferentes partes de la guía, puesto a que siempre se fijaba a la bancada. En este mecanismo sí que ha resultado necesario pensar en esta unión ya que según la inversión a representar la guía debe tener la capacidad de moverse.

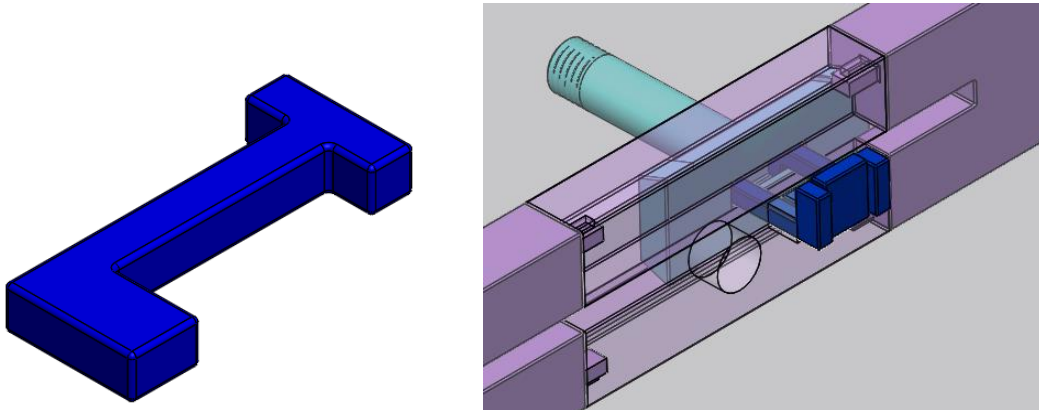
#### **4.2.3. Uniones entre los elementos y la bancada**

En esta maqueta representar las inversiones cinemáticas resulta una tarea más elaborada que en el mecanismo cuadrilátero articulado porque los elementos a fijar son distintos según la inversión, es decir no son siempre barras como en la primera maqueta. Este hecho implica que se tengan que emplear más diversidad de piezas para conseguir las distintas fijaciones.

La fijación de la guía o de las barras a la bancada, según la inversión y las uniones de los elementos entre sí, se han implementado mediante el uso tornillos, tuercas y separadores, como en la maqueta del mecanismo cuadrilátero articulado. Se han vuelto a reutilizar los diseños del proyecto de Aitor Garcia [4], a los que también se les han realizado modificaciones de diámetro y longitud.

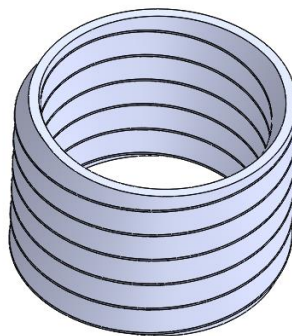
Por lo tanto, empleando tornillos, tuercas y separadores se consiguen representar tres de las cuatro inversiones del mecanismo. La inversión restante (corredera fija) se obtiene fijando la corredera a la bancada, por lo que se ha diseñado un sistema de 3 piezas que permita esta sujeción.

El sistema consiste en dos piezas en forma de T, que se introducen en la ranura de la bancada y dentro de la corredera, y una pieza en forma de L que hace de separación entre los elementos en forma de T (Figura 44).



*Figura 44: Sistema de fijación de la corredera a la bancada*

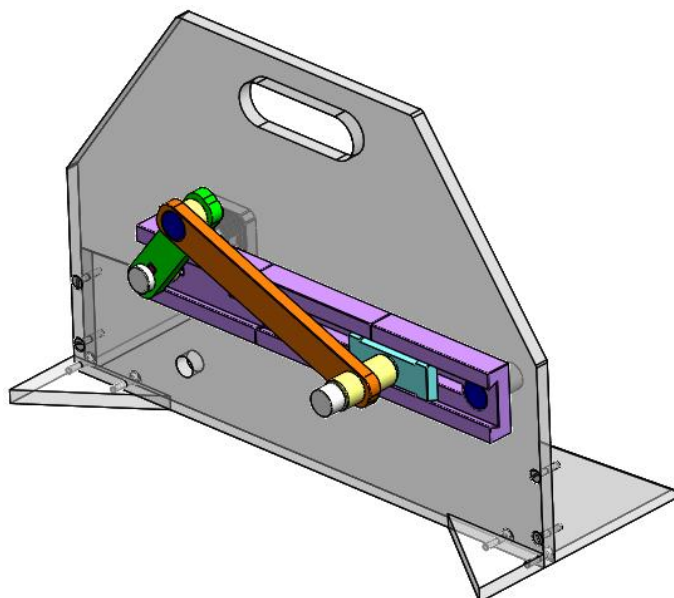
En esta configuración es necesario también que el tornillo que une la guía y la barra verde quede roscado en la guía para asegurar que éste no pueda soltarse con facilidad durante el movimiento del mecanismo. Para que la guía tenga la capacidad de seguir funcionando correctamente en las otras inversiones y a la vez conseguir una unión roscada en esta inversión, se ha diseñado una pieza adicional que ayuda a cumplir con el cometido, un adaptador diámetro con rosca. En la guía se incorpora un agujero roscado de diámetro superior a la rosca del tornillo, de forma que este pueda actuar como pasador para las otras inversiones, y mediante el adaptador de diámetro se consigue reducir el diámetro este agujero roscado de forma que se adapte a la rosca del tornillo (Figura 45).



*Figura 45: Adaptador de diámetro*

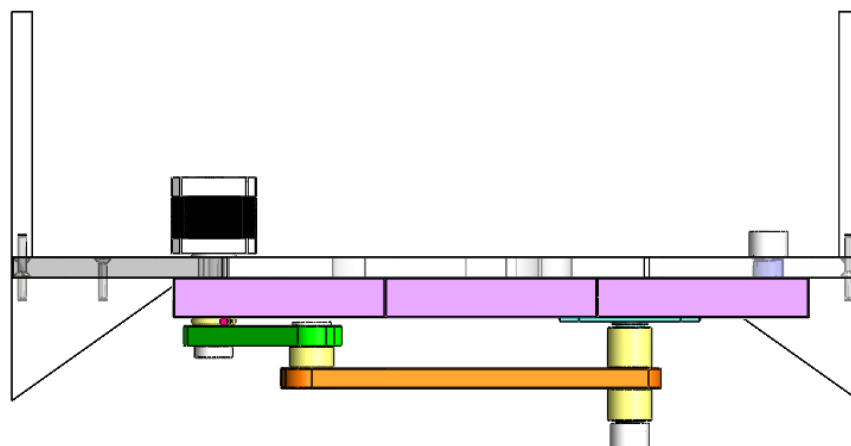
#### 4.2.4. Nueva maqueta didáctica del mecanismo manivela-biela-pistón

Al ensamblar todos los componentes mencionados anteriormente se obtiene la nueva maqueta del mecanismo manivela-biela-pistón (Figura 46). El mecanismo resultante es capaz de representar todas las inversiones cinemáticas utilizando una única bancada, modificando los elementos fijados a la bancada como se ve más adelante.



*Figura 46: Vista 3D de la nueva maqueta didáctica del mecanismo manivela-biela-pistón*

En la Figura 47, se muestra la vista en planta del diseño 3D de la maqueta motorizada, donde se ve la distribución en planos paralelos tenida en cuenta para evitar la colisión de los elementos del mecanismo durante el funcionamiento.



*Figura 47: Vista en planta del mecanismo manivela-biela-pistón*

Como se observa en las figuras anteriores, Figura 46 y 47, en esta maqueta didáctica también se ha seguido el mismo código de colores ya establecido para la colección de recursos virtuales.

A continuación, se muestran las vistas en alzado de las distintas inversiones del mecanismo y la indicación del esquema de símbolo superpuesto sobre el mecanismo, así como el esquema de símbolos individual con la indicación de los parámetros geométricos correspondientes a cada inversión.



A continuación, en la Figura 48, se expone la vista en alzado de la primera inversión que da lugar a un mecanismo de manivela-biela-balancín, que cumple con el criterio de Grashof.

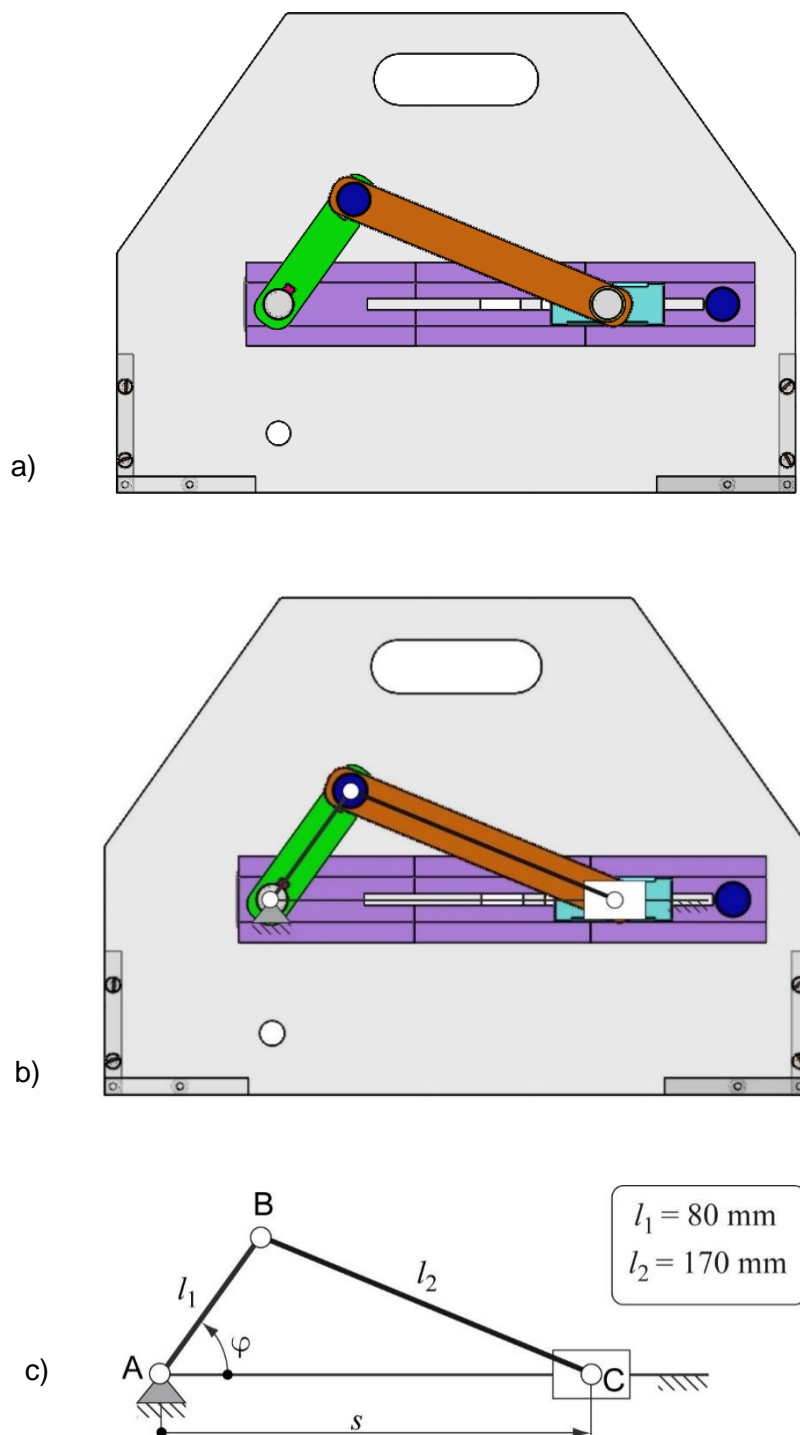


Figura 48: Primera inversión del manivela-biela-pistón: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros

A continuación, en la Figura 49, se expone la vista en alzado de la segunda inversión del que da lugar a un mecanismo de manivela-biela-colisa, que cumple con el criterio de Grashof.

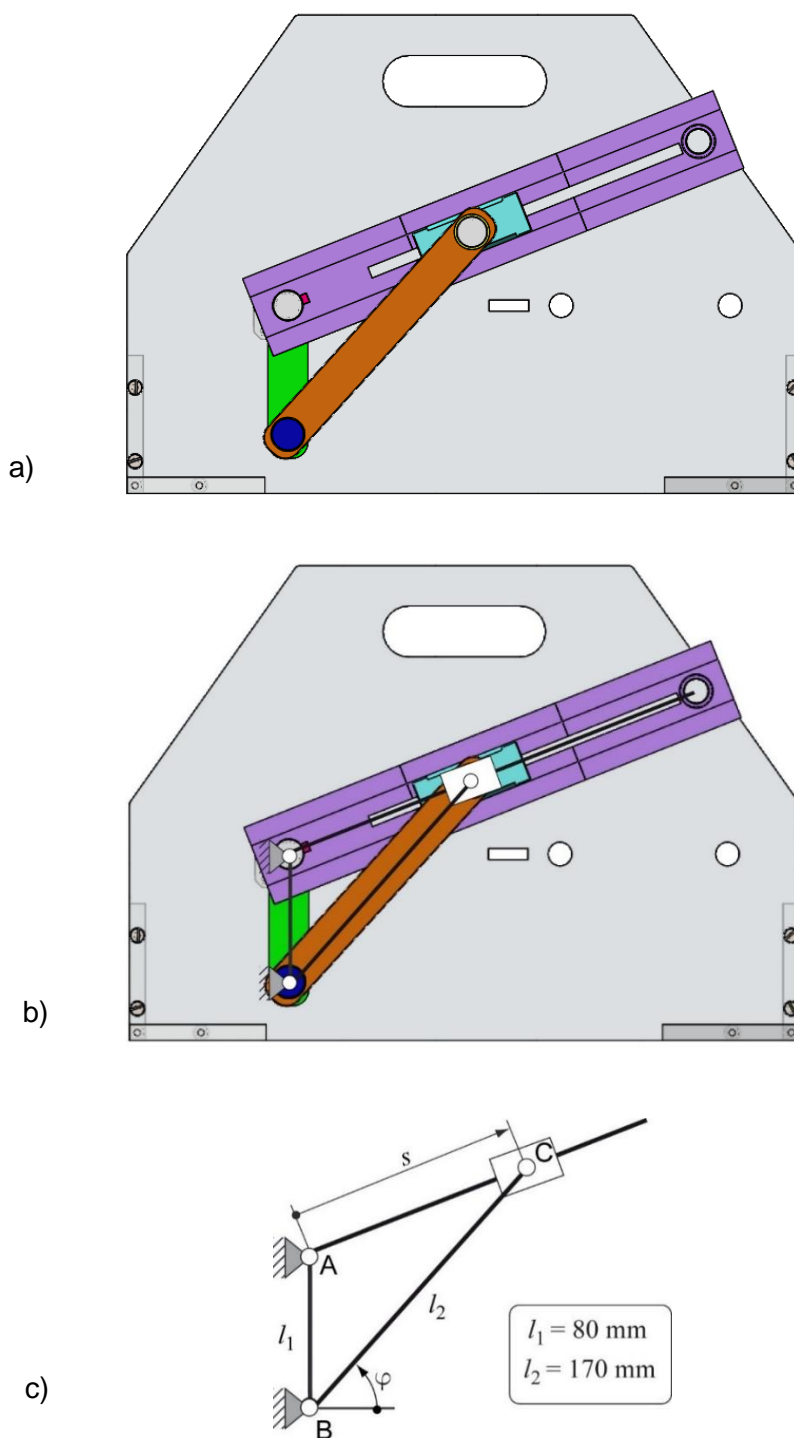


Figura 49: Segunda inversión del manivela-biela-pistón: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros

A continuación, en la Figura 50, se expone la vista en alzado de la tercera inversión del mecanismo que da lugar a un mecanismo de manivela-biela-corredera fija y guía que se traslada, que cumple con el criterio de Grashof.

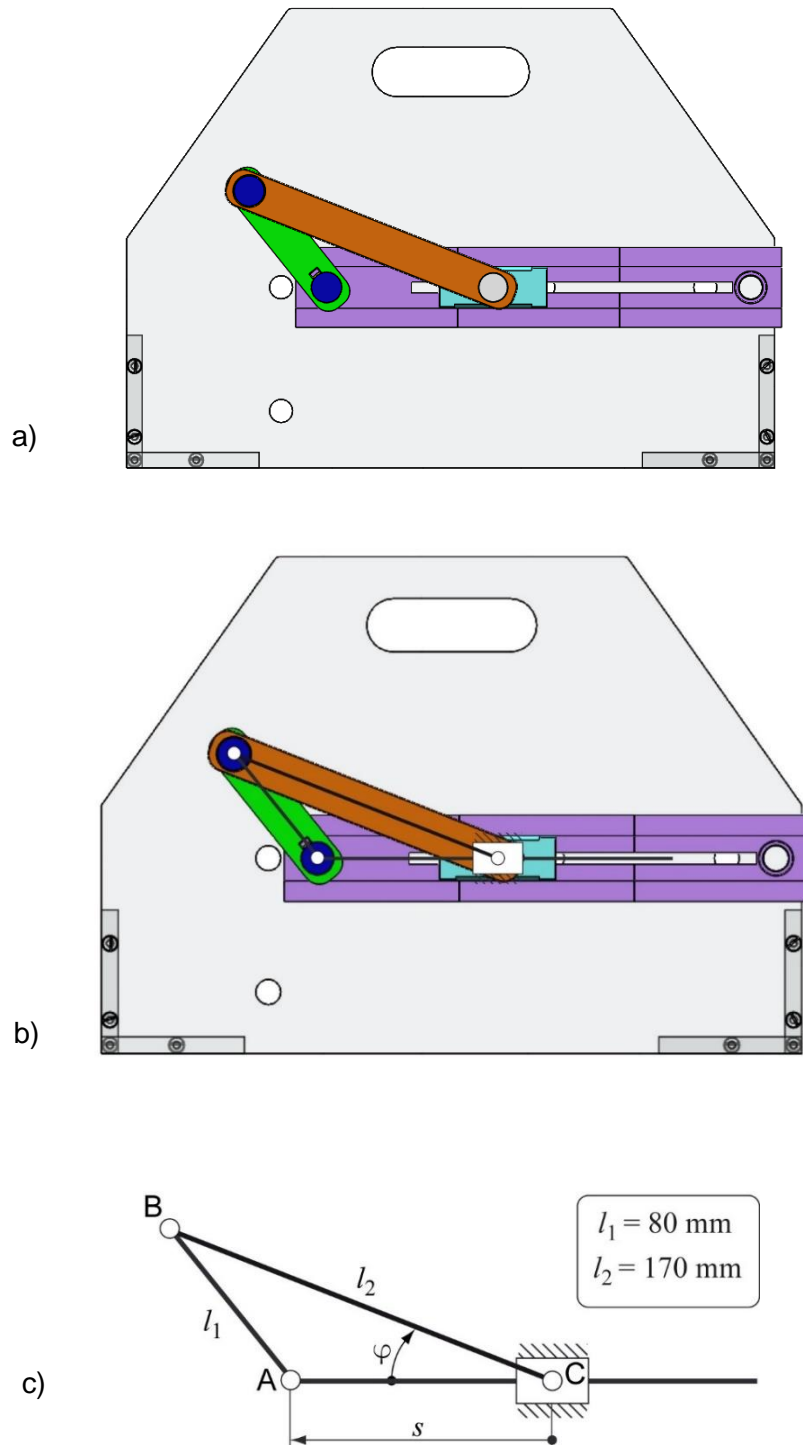


Figura 50: Tercera inversión del mecanismo: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros

A continuación, en la Figura 51, se expone la vista en alzado de la cuarta inversión del cuadrilátero articulado que da lugar a un mecanismo de manivela-biela y guía con rotación, que cumple con el criterio de Grashof.

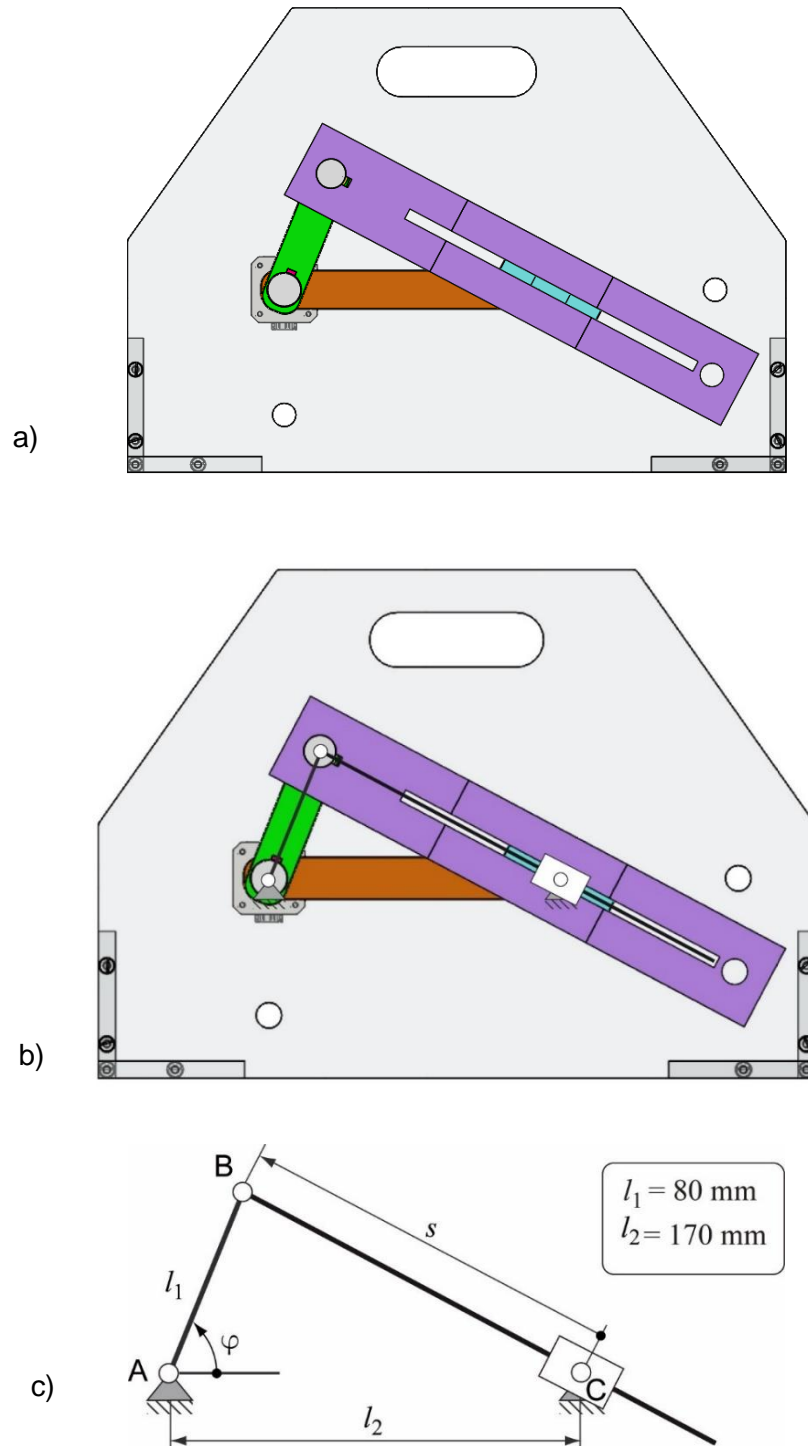


Figura 51: Cuarta inversión del mecanismo: a) Vista en alzado, b) Esquema superpuesto y c) Esquema con parámetros



Una vez realizados los ensamblajes de las distintas inversiones cinemáticas, para complementar el modelo virtual, se procede a la creación de una simulación del funcionamiento de dicho modelo, que se guarda en el formato de vídeo .mp4. El objetivo de estas simulaciones es ayudar al estudiante a comprender con más claridad el funcionamiento de los mecanismos obtenidos.

Igual que en el mecanismo anterior, para la realización de estas simulaciones y posterior exportación a video se ha utilizado el paquete *SolidWorks Motion* del que dispone la herramienta SolidWorks.

Como en el diseño del mecanismo cuadrilátero articulado, todas las piezas diseñadas para el mecanismo expuesto constan de redondeos de 0,5mm, evitando ángulos de 90 grados, favoreciendo así su impresión 3D y dejando también 0,2mm de margen entre ejes y agujeros.

En el Anexo 6 se encuentran los planos de algunas de las piezas diseñadas.

## 5. Motorización y control

Como se observa en las nuevas maquetas didácticas, su diseño está preparado para que se acople de un motor que accione el mecanismo. En este apartado se expone la propuesta de motorización de estas maquetas juntamente con las posibilidades de control que se podrían ofrecer.

Motorizando el mecanismo se pretende, igual que con las simulaciones, ayudar al estudiante a comprender con más claridad el funcionamiento de los mecanismos obtenidos.

### 5.1. Elección del motor

Para escoger que motor es el adecuado para ejercer como actuador en las maquetas hay que considerar los requerimientos necesarios para este tipo de aplicaciones. La función que desempeñará el motor se limita en hacer girar elementos que desarrollan la función de manivela, estos están fabricados de PLA por lo que su peso no es elevado, este hecho implica que no es necesario exigirle un par muy elevado al motor. Otro factor importante que considerar es la velocidad, ya que esta también va a determinar el tipo de motor a utilizar. El objetivo de motorizar la maqueta es que los estudiantes comprendan con más facilidad el comportamiento de estos mecanismos por lo que no es necesario una velocidad de giro elevada, sino que es preferible un movimiento suave para observar con claridad el movimiento que describe cada elemento.

Los motores más apropiados para realizar esta función son los motores paso a paso (Figura 52 a), a los que se puede añadir un reductor (que viene incorporado en ciertas unidades, Figura 52 b), y los servomotores (Figura 52 c).

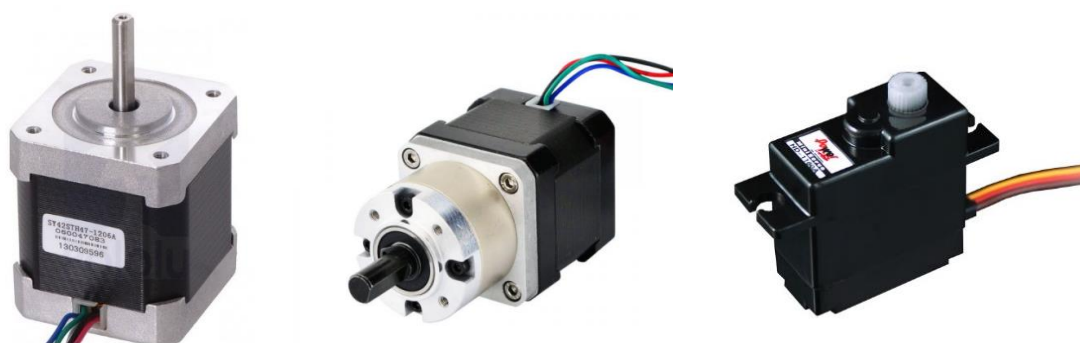


Figura 52: a) Motor paso a paso, b) Motor paso a paso con reductor y c) Servomotor



Los servomotores son la opción más adecuada para sistemas donde se requiere gran velocidad de giro, gran aceleración y primordialmente alta precisión de posicionado mientras que los motores paso a paso son buenas soluciones para aplicaciones de baja velocidad, aceleración baja y requisitos de baja precisión de posicionado. Por otro lado, los motores paso a paso que incorporan un reductor permiten trabajar con mayor par, pero velocidad de salida inferior que los motores paso a paso normales. [29]

Por lo tanto, para la aplicación a realizar en este proyecto se ha propuesto un motor paso a paso para cada maqueta tipo Nema 17, en concreto el modelo 17HS4401. Este tipo de motores cumple los requerimientos necesarios para las maquetas didácticas, ya que no es necesario el aumento de par que genera el motor reductor ni el aumento de prestaciones de los servomotores, y es más económico que estas alternativas. [30]

El motor en cuestión tiene un ángulo de paso de 1,8 grados y trabaja a 12V y a una corriente de 1,7A con un torque de retención de 40N·cm.

Otra opción distinta a las anteriormente mencionadas es el uso de un motor de corriente continua, el cual es de interés para maquetas en las que solo se quiere mostrar el movimiento del mecanismo y no es necesario un control variable de su funcionamiento.

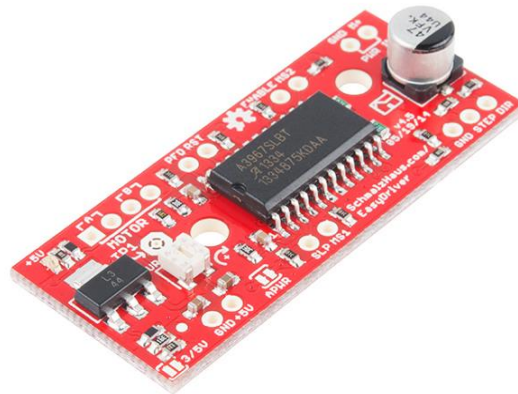


*Figura 53: Motor de corriente continua de 5V*

## 5.2. Controlador

El motor paso a paso nos permite controlar el funcionamiento del mecanismo, pero para ello se necesita la ayuda de un controlador y de una placa Arduino.

La función del controlador es alimentar el motor, con la intensidad de corriente y el voltaje adecuado, a partir de las señales que este recibe de la placa Arduino. Los motores paso a paso se han usado en recursos didácticos ya disponibles en el Departamento de Ingeniería Mecánica como un mecanismo de retorno rápido y un mecanismo de cruz de Malta, en los que también se han usado controladores. El controlador usado en algunas de estas maquetas ha sido el *EasyDriver* (Figura 54).



*Figura 54: Controlador EasyDriver [31]*

Los motores paso a paso se mueven en pasos discretos o fracciones de revolución. El motor paso a paso seleccionado se mueve con un ángulo de paso de 1.8 grados, por lo que dará 200 pasos por cada revolución completa del eje del motor. Este tipo de movimiento implica que la rotación del motor no es perfectamente suave, y cuanto más lenta es la rotación, menos suave es debido al tamaño de paso relativamente grande. Para mejorar la suavidad a bajas velocidades es posible reducir el tamaño de los pasos del motor empleando un controlador.

Una de las características más interesantes del controlador es la capacidad de dividir cada paso completo en pasos más pequeños para ayudar a suavizar la rotación del motor, especialmente a velocidades lentas, trabajando así en micropasos. El controlador *EasyDriver* permite ajustar la resolución de los micropasos, es decir, permite dividir cada paso entre 2, 4 o 8. Para ajustar la resolución de los micropasos se usan los pines MS1 y MS2 como se indica en la siguiente tabla (Tabla 1). Si no se conecta ninguna señal el controlador trabaja en la resolución más alta, cada paso estará dividido en 8 micropasos.

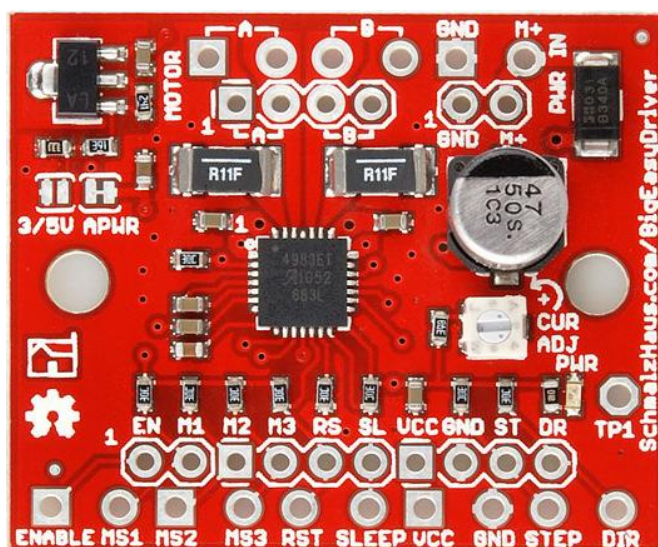
*Tabla 1: Microstep Select Resolution Truth Table of EasyDriver*

MS1	MS2	Microstep Resolution
L	L	Full Step
H	L	Half Step
L	H	Quarter Step
H	H	Eighth Step



Otra característica interesante del controlador es que nos ofrece la capacidad de controlar el motor mediante las entradas lógicas “step” y “dir”. La entrada “step” recibe señales lógicas, lo que significa que solo lee dos valores distintos (“low” o “high”) enviados desde la placa Arduino, que indican al controlador información sobre los pasos a girar. Cada cambio entre “low” y high” implica que el motor dará un paso. La entrada “dir” también es una entrada lógica que en este caso permite controlar la dirección de giro del motor, en sentido horario o antihorario.

Sin embargo, hay un problema que impide utilizar el componente EasyDriver en este proyecto, se trata de la capacidad de la placa para alimentar el motor. Este controlador incorpora un potenciómetro regulable con capacidad de suministrar al motor una corriente entre 150mA y 750mA. El motor Nema 17 escogido necesita una alimentación de 1,7A para funcionar correctamente por lo que se necesita un controlador capaz de aguantar esta corriente. Una alternativa al controlador EasyDriver con similares propiedades es su hermano mayor, el controlador BigEasyDriver (Figura 55).



*Figura 55: Controlador BigEasyDriver [31]*

La principal diferencia entre estos controladores es que el BigEasyDriver tiene la capacidad de controlar un motor paso a paso suministrando una corriente entre 0 y 2A, es decir, es compatible con el motor seleccionado para las maquetas.

Otra característica destacable de este controlador es que admite más resolución de pasos, permitiendo dividir cada paso hasta en 16 micropasos mediante los pines MS1, MS2 y MS2 como se indica en la siguiente tabla (Tabla 2), que permiten configurar su funcionamiento a paso completo (Full step), medio paso (Half step), un cuarto de paso (Quarter step), un octavo de paso (Eighth step) y 16 partes de un paso (Sixteenth step). Si no se conecta ninguna señal el controlador trabaja en la resolución más alta, cada paso estará dividido en 16 micropasos.

*Tabla 2: Microstep Select Resolution Truth Table of BigEasyDriver*

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
L	L	L	Full Step
H	L	L	Half Step
L	H	L	Quarter Step
H	H	L	Eighth Step
H	H	H	Sixteenth Step

Este controlador también contiene las entradas “step” y “dir” que se controlan igual que en el controlador EasyDriver, comentado anteriormente.

Un detalle importante de ambos controladores es que requieren de una fuente de alimentación externa de corriente continua de entre 6V y 30V.

En los Anexos 2 y 3 se detallan con más profundidad las características del controlador EasyDriver y BigEasyDriver respectivamente.

### 5.3. Placa Arduino

El elemento encargado de ejecutar el programa, con las instrucciones para el funcionamiento deseado del motor y por ende del mecanismo, y de enviar las órdenes a realizar al controlador del motor, es la placa Arduino UNO. Se ha escogido esta placa porque es una de las más básicas, pero consta de suficientes pines (analógicos y digitales) y memoria como para realizar las funciones necesarias en este proyecto y da margen a ser usada también para futuras aplicaciones de control más complejas a la actual.



*Figura 56: Placa Arduino UNO [32]*



## 5.4. Código y control

La propuesta de control se ha centrado en hacer que la maqueta tenga la capacidad de moverse de distintas formas para mostrar su funcionamiento a los alumnos. Buscando esa finalidad se ha decidido crear un programa que permita controlar de forma fácil la velocidad y el sentido de rotación del motor, y en el que sea también fácil pausar el mecanismo para permitir al docente explicar los aspectos o detalles que considere.

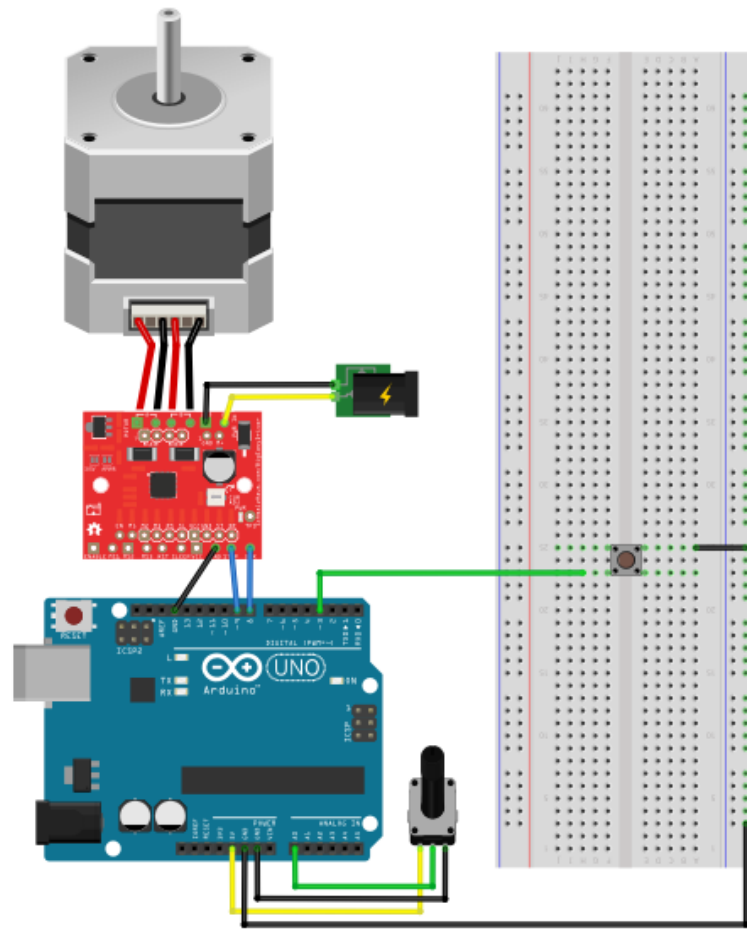
Para generar el código de programación y subirlo a la placa Arduino UNO se emplea el propio lenguaje y entorno de programación de Arduino (IDE), descargable de forma gratuita en su página web. Para desarrollar el código se ha empleado la librería gratuita “AccelStepper” [33] que permite controlar con facilidad la velocidad y la aceleración de motores paso a paso. En el código resultante no se han usado todos los métodos que contiene esta librería, es decir hay más funciones disponibles para controlar el motor de las utilizadas, dejando margen a modificar el programa para controlar el motor orientándolo a aplicaciones diferentes.

El programa diseñado permite que todo el funcionamiento del motor se controle mediante un pulsador y un potenciómetro. Cuando se inicia el programa el motor permanece en reposo hasta que se presiona el pulsador, cuando este se haya presionado el motor recibe la orden de girar en un sentido a la velocidad que se desee, la cual es controlada por el potenciómetro. Cuando se vuelve a presionar el pulsador, se pausa el motor y este reanudará el movimiento, ahora en sentido contrario, cuando se vuelva a presionar el pulsador, y así sucesivamente.

El código de programación creado para generar el comportamiento descrito puede consultarse en el Anexo 4.

A continuación, se muestra un esquema del montaje electrónico necesario entre los distintos componentes que permiten controlar el mecanismo, creado con la herramienta Fritzing [34].





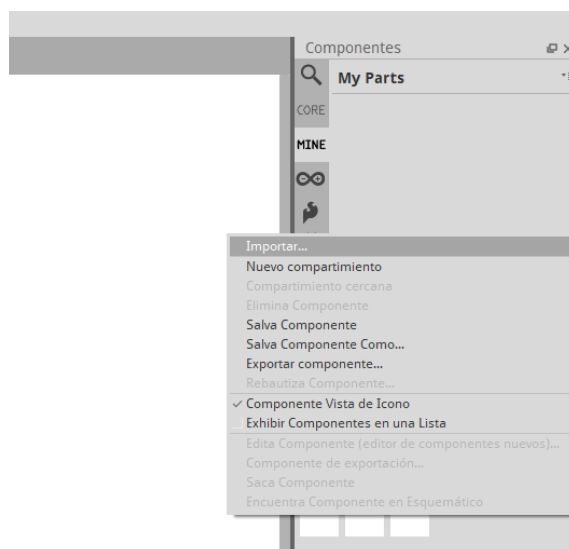
*Figura 57: Esquema de las conexiones entre todos los componentes*

Como se observa en la imagen anterior (Figura 57), Fritzing permite crear esquemas con los componentes necesarios para un sistema de control y sus respectivas conexiones, incluso indicando colores a los cables según los elementos que conecte.

Los componentes que aparecen en el esquema anterior son: el motor paso a paso, el controlador BigEasyDriver (placa roja), una fuente de alimentación externa (representada con una batería), la placa Arduino UNO, un potenciómetro de tipo giratorio (conectado con 3 cables de colores verde, negro y amarillo), un pulsador (colocado en la franja centra de la protoboard) y una placa protoboard de conexiones. Todos los componentes están incluidos en las librerías de Fritzing excepto el BigEasyDriver que se ha obtenido de una fuente web externa al programa de forma gratuita [35]. Una vez descargado el componente se puede añadir de manera fácil al esquema como se indica en la siguiente imagen (Figura 58).







*Figura 58: Captura del programa Fritzing*

Para añadir el archivo descargado hay situarse en la parte derecha de la aplicación, en el menú de componentes. Una vez en el menú, si se hace click derecho con el ratón se puede seleccionar la opción importar, y solo queda seleccionar el archivo “.fzpz” que se haya descargado. Para encontrar de forma rápida el nuevo componente, solo hay que ir al submenú “my parts” donde aparecerán los componentes que se hayan añadido siguiendo estos pasos.

A continuación, se detallan las conexiones realizadas para el correcto funcionamiento del sistema de control acorde al programa realizado en este proyecto. Como se puede observar en la siguiente imagen (Figura 59), el potenciómetro se conecta a la placa Arduino mediante 3 pines distintos, una toma de 5V, una toma GND, y un pin analógico. Se ha escogido el pin analógico A0 pero no es una condición indispensable siempre que se modifique el programa acorde al cambio realizado. En lo que refiere al pulsador, se ha conectado al pin digital 3 e igual que en el potenciómetro, este puede ser el escogido siempre que se modifique en el código. También se observa la conexión entre el pin digital 8 y el pin “dir” del BigEasyDriver y la conexión entre el pin digital 9 y en pin “step” también del controlador. Los pines digitales 8 y 9 actúan como salidas de la placa Arduino y son los que emitirán las señales al controlador para indicar la dirección y el avance de los pasos.

La fuente de alimentación externa se conecta a los pines “M+” y “GND” del controlador BigEasyDriver.

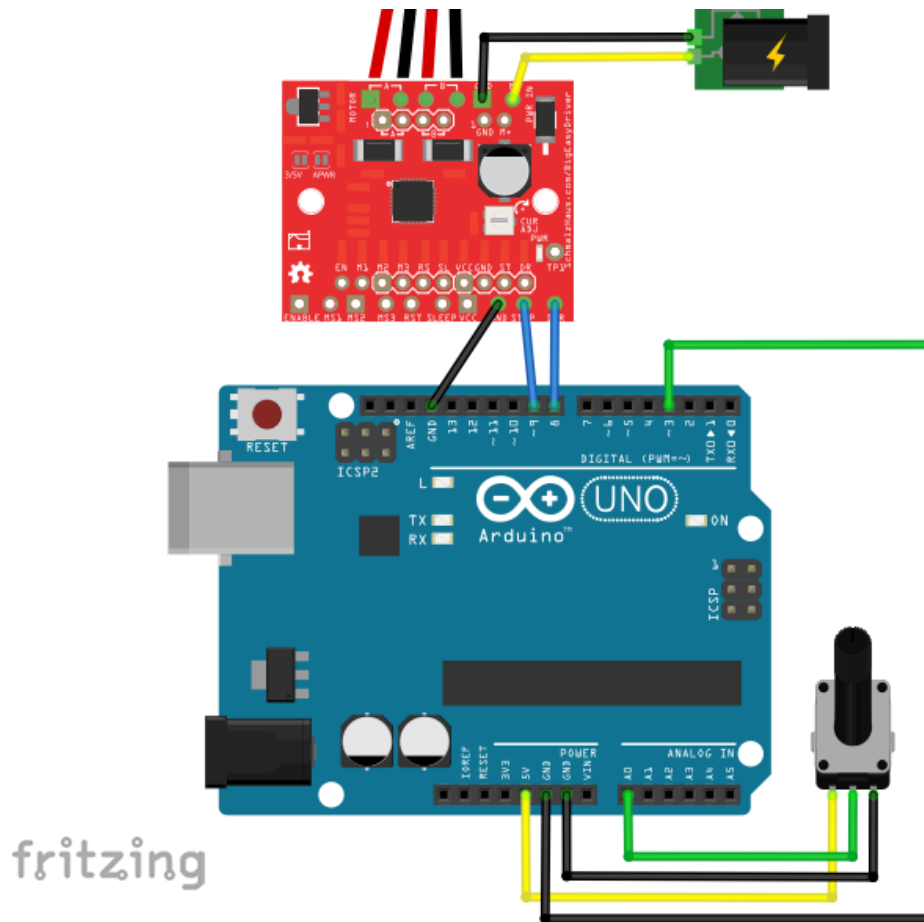


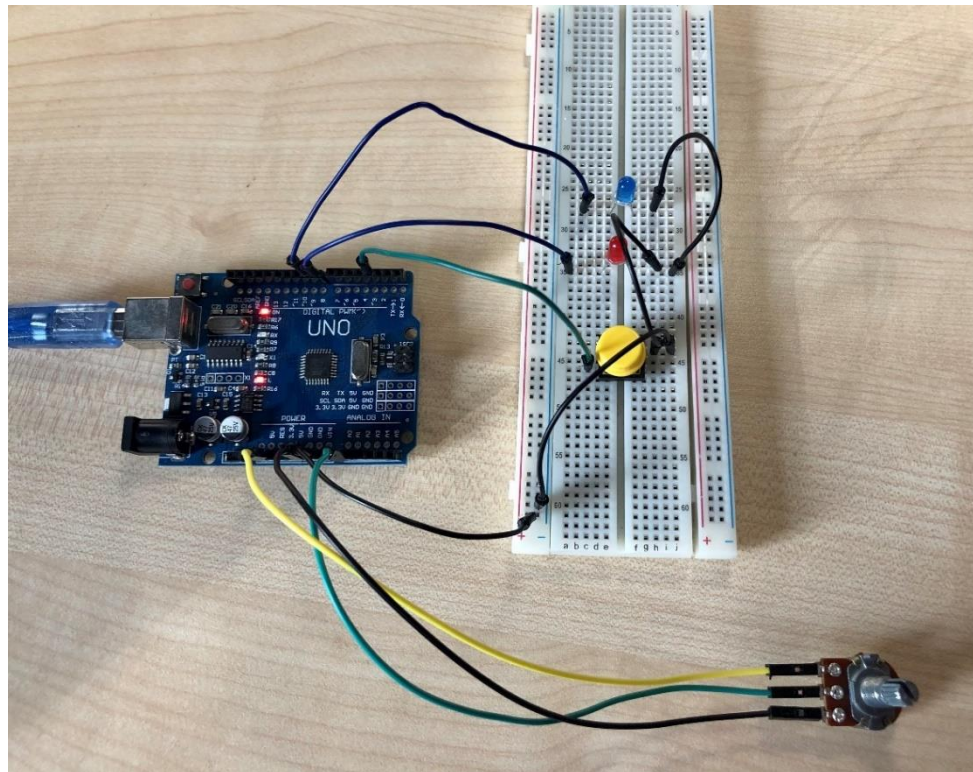
Figura 59: Conexiones entre Arduino, potenciómetro y BigEasyDriver

## 5.5. Verificación del código

Se ha verificado el correcto funcionamiento del código de programación en Arduino mediante el diseño de un montaje en el que se ha substituido el motor paso a paso y el controlador BigEasyDriver por unos leds. Se han incorporado los leds ya que era más fácil tener acceso a estos que no al motor y controlador especificados.

El led conectado al pin 8 (color rojo) permite conocer que señal le llega al pin “dir” del controlador, de tal forma que cuando este se enciende significa que el motor giraría en un sentido y cuando se apaga giraría en el sentido opuesto. El led conectado al pin 9 (color azul) permite saber que señal le llega al pin “step” y así, estimar la velocidad a la que girará el motor. Si se aprecian los parpadeos del led azul significa que el motor estaría funcionando a poca velocidad, mientras que cuando dejan de apreciarse los parpadeos y el led se enciende con intensidad el motor estaría girando más rápido.





*Figura 60: Montaje realizado para verificar el código de programación*

## 6. Costes

### 6.1. Coste de las maquetas comercializadas

Para desarrollar un estudio de los costes de las maquetas de mecanismos básicos como los antes citados, que son comercializadas por distintas empresas nacionales como internacionales, se ha realizado una primera búsqueda para determinar que empresas se dedican a ofrecer este tipo de productos.

Todas las empresas que se dedican a este sector ofrecen catálogos *online* en sus respectivas páginas web, donde se pueden ver los distintos productos disponibles, pero no sus precios. Para conocer dichos precios se tiene que realizar una solicitud de presupuesto indicando en ella cuales son los productos de interés.

Algunas de las empresas que se dedican a este sector son las siguientes:

- Edibon (Edibon International. Madrid. España)
- TecQuipment Academia (Nottingham, United Kingdom)
- Gunt (Barsbüttel, Alemania). El distribuidor de esta empresa en España es Sidilab (Sistemas Didácticos de Laboratorio)

Finalmente, por motivos de confidencialidad algunas de las empresas mencionadas anteriormente no facilitaron los precios de sus productos, tan solo las características de éstos. Se ha conseguido recopilar información de los distribuidores TecQuipment y Sidilab.

*Tabla 3: Precios comerciales de las maquetas de mecanismos según el distribuidor<sup>2</sup>*

	<b>TecQuipment</b>	<b>Sidilab (Gunt)</b>
<i>Cuadrilátero articulado</i>	675,00 €	1.701,94 €
<i>Manivela-biela-pistón</i>	600,00 €	1.701,94 €
<i>Mecanismo de retorno rápido</i>		1.638,80 €
<i>Cruz de malta</i>	350,00 €	-
<i>Leva-Palpador</i>	650,00 €	-
<i>Engranajes</i>	-	1.353,92 €
<b>Precio Total<sup>3</sup></b>	<b>2.600 € + precio soporte</b>	<b>6.396,60 €</b>

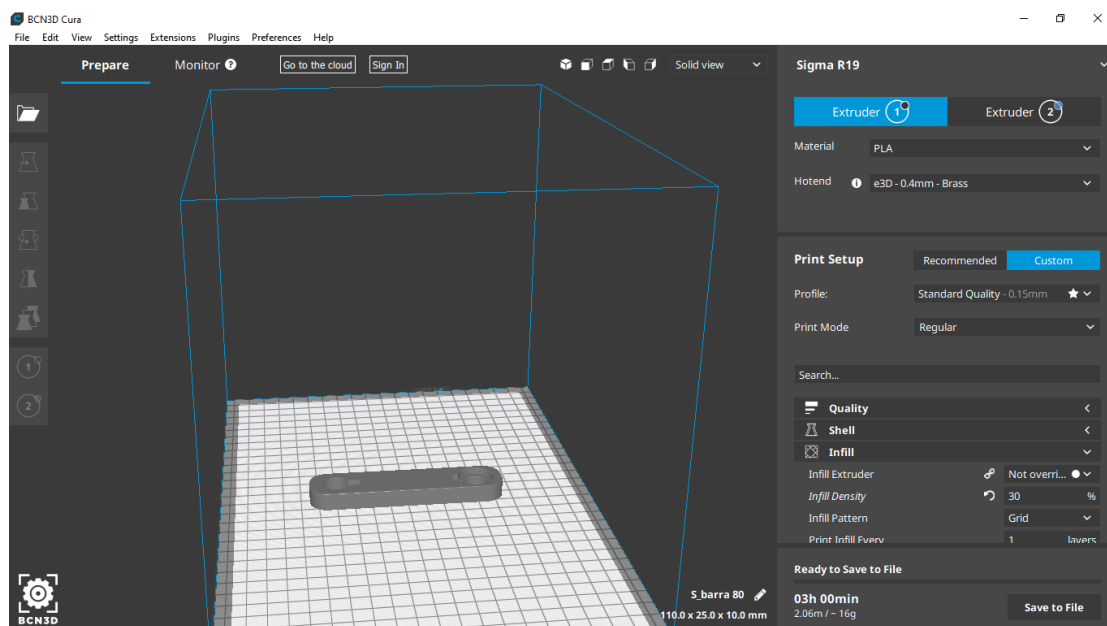
<sup>2</sup> Todos los precios de la tabla incluyen IVA

<sup>3</sup> Precio total de todos los mecanismos incluyendo gastos de envío a la ETSEIB



## 6.2. Coste de las maquetas autoproducidas

Una vez obtenida la información de los costes de las maquetas didácticas disponibles en el mercado es necesario conocer los costes de autoproducción de los nuevos diseños. Para conocer estos costes se ha empleado la herramienta BCN3D Cura (Figura 61) que permite configurar los parámetros de impresión 3D que se requieran y da una estimación del material consumido en su fabricación y el tiempo de fabricación de la pieza a fabricar.



*Figura 61: Preparación de la impresión 3D con la herramienta BCN3D Cura*

Los parámetros de impresión 3D que se han seleccionado para la futura fabricación de las piezas son: a) relleno de la pieza del 30% (infill), b) un grosor de las paredes de 1.2 mm (wall thickness), es decir, 3 veces el diámetro de la boquilla de impresión, c) velocidad de impresión de 40mm/min. El material seleccionado ha sido el PLA que tiene un coste de 23€/kg. [36]

En las siguientes tablas (Tabla 4 y 5), se muestran los costes que supone imprimir todas las piezas que se requieren para la implementación física de las maquetas.

*Tabla 4: Coste aproximado de impresión 3D de las piezas del mecanismo cuadrilátero articulado, por material consumido*

<b>Pieza</b>	<b>Masa [g]</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio [€]</b>
Fijador	9	1	0,207
Cierre fijador	4	1	0,092
Separador 118	3	4	0,276
Elemento en forma de C	25	3	1,725
Extensión	14	3	0,966
Tornillo largo	6	1	0,138
Tornillo	4	2	0,184
Transmisión par	4	1	0,092
Tuerca corta	1	2	0,046
Tuerca corta inv4	2	1	0,046
Tuerca	3	1	0,069
Actuador manual	13	1	0,299
<b>TOTAL</b>			<b>4,14</b>

*Tabla 5: Coste aproximado de impresión 3D de las piezas del mecanismo manivela-biela-pistón, por material consumido*

<b>Piezas</b>	<b>Masa [g]</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio [€]</b>
Corredera modificada	19	1	0,437
Guía milano hembra	48	1	1,104
Guía milano macho	49	1	1,127
Guía milano macho derecha	48	1	1,104
Tornillo modificado	4	2	0,184
Tuerca modificada	3	2	0,138
Barra 80	16	1	0,368
Barra 170	32	1	0,736
Transmisión par	5	1	0,115
Separador 118	3	1	0,069
Tuerca modificada corta	1	2	0,046
Separador barra 80	2	2	0,092
Separador 16	3	2	0,138
Separador 203	4	1	0,092
Adaptador diámetro	1	1	0,023
T	2	2	0,092
Fijador	2	1	0,046
Separador 135	3	1	0,069
Separador tornillo largo	7	1	0,161
Tornillo modificado inv 4	7	1	0,161
Tornillo modificado largo	9	1	0,207
Tuerca modificada corta inv 4	2	1	0,046
<b>TOTAL</b>			<b>6,56</b>



Como se observa el coste de la impresión, de acuerdo con el material consumido, es muy bajo debido a que únicamente se ha considerado el precio del PLA. La máquina de impresión BCN 3D delta del DEM, se considera completamente amortizada, por los más de diez años de utilización y la mano de obra es cubierta por el propio profesorado y el técnico de investigación.

Aun así, para el cálculo de los costes de fabricación es necesario considerar otros aspectos como el coste del metacrilato, tornillos e imanes y el coste de los componentes electrónicos (Tabla 6) necesarios para controlar el movimiento de la maqueta, que se exponen a continuación.

*Tabla 6: Coste de los elementos de motorización y control*

Componentes	Precio [€]
Motor [30]	7,85
Arduino [32]	24,20
BigEasyDriver [37]	21,72
Fuente de alimentación [38]	13,59
Potenciómetro [39]	1,90
<b>TOTAL</b>	<b>69,26</b>

La maqueta también está formada por elementos de metacrilato (bancada). Se ha realizado el diseño de las nuevas maquetas didácticas teniendo en cuenta que los elementos de metacrilato se pudieran obtener a partir de una placa DIN A3 en cada maqueta y empleando corte con láser.

Se ha pedido presupuesto a la empresa Servei Estació para conocer el coste del corte con láser en una placa de metacrilato DIN A3 con un grosor de 10mm para obtener las piezas deseadas. El precio de cada placa de metacrilato es de 20,65€ [40] y el precio del corte con láser para una placa es de 13,50€.

En el precio final de la maqueta también se ha considerado el precio de los tornillos [41] para unir las diferentes piezas de metacrilato y el precio de los imanes de neodimio [27]. Para calcular estos costes se ha considerado el número de elementos usados para cada maqueta como se muestra en la siguiente tabla (Tablas 7 y 8)

*Tabla 7: Costes de los imanes y tornillos del mecanismo cuadrilátero articulado*

Producto	precio de venta [€]	Unidades	Piezas necesarias	Coste [€]
Imanes	5,75	20	48	13,80
Tornillos métrica 4	14,4	150	11	1,06



*Tabla 8: Costes de los imanes y tornillos del mecanismo manivela-biela-pistón*

Producto	precio de venta [€]	Unidades	Piezas necesarias	Coste [€]
Imanes	5,75	20	8	2,30
Tornillos métrica 4	14,4	150	8	0,77

Agrupando los costes anteriores para cada mecanismo se consigue el precio final de fabricación para cada maqueta autoproducida. A continuación, se muestra el desglose y el precio final para cada maqueta (Tabla 9)

*Tabla 9: Costes de los mecanismo cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón respectivamente*

Costes	Precio [€]	Costes	precio [€]
Impresión 3D	4,14	Impresión 3D	6,56
Elementos de control	69,26	Elementos de control	69,26
Imanes	13,80	Imanes	2,30
Metacrilato	20,65	Metacrilato	20,65
Tornillos	1,06	Tornillos	0,77
Corte con láser	13,50	Corte con láser	13,50
<b>TOTAL</b>	<b>122,41</b>	<b>TOTAL</b>	<b>113,04</b>

En el coste previsto para la fabricación de las maquetas autoproducidas resulta a simple vista mucho más ventajoso que el de las maquetas comercializadas.

### 6.3. Coste del proyecto

Para calcular el coste del proyecto se han considerado los distintos recursos usados para la realización de este, pero no se ha incluido el precio de materialización de las maquetas ni el coste del ordenador con el que se ha trabajado. El coste del ordenador no se ha incluido porque se trata un recurso del que ya se disponía y está ya amortizado.

El proyecto tiene un coste de realización por las horas dedicadas del presente autor. Para calcular este coste se ha estimado un precio de 25€/h por el trabajo realizado de un ingeniero técnico “junior” y se han desglosado las horas dedicadas a cada tarea como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 10).





*Tabla 10: Desglose en horas y coste de las tareas realizadas en este proyecto*

<b>Tarea</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Coste [€]</b>
Planificación	10	250
Búsqueda de información: marco teórico y recursos disponibles en la escuela	40	1000
Búsqueda de maquetas comercializadas	30	750
Diseño de las maquetas y modelaje	80	2000
Ensamblaje y animación	35	875
Control	40	1000
Estudio de costes de maquetas autoproducidas	20	500
Memoria y anexos	75	1875
<b>TOTAL</b>	<b>330</b>	<b>8250</b>

Para realizar todas las tareas mencionadas anteriormente, es necesario el uso de distintas herramientas de software. En la siguiente tabla (Tabla 11), se muestra el cálculo de los costes de software considerando el tiempo que se han utilizado.

*Tabla 11: Coste del Software*

<b>Herramienta</b>	<b>Precio de suscripción [€]</b>	<b>Periodo de suscripción [meses]</b>	<b>Periodo de uso [meses]</b>	<b>Coste [€]</b>
Microsoft Office	69	12	9	51,75
Adobe Illustrator	19,66	1	9	176,94
Fritzing	-	-	-	8
<b>TOTAL</b>				<b>236,69</b>

Además de las herramientas mencionadas en la Tabla 11, también se han usado SolidWorks y BCN3D Cura pero no suponen un coste de software debido a que la universidad facilita su uso de forma gratuita a los estudiantes. Por otro lado, se ha usado también el software de Arduino, gratuito en su página web.

Juntando los costes anteriores, se determina que el coste total de realización del proyecto es de **8.486,69 €**.

## 7. Comparativa entre maquetas autoproducidas y comercializadas

Como se ha comentado anteriormente, es de interés comparar las maquetas autoproducidas con las comercializadas para así poder establecer qué tipo de maqueta es la más adecuada como soporte didáctico de la asignatura de Teoría de Maquina y Mecanismos.

Como es de esperar los acabados y los materiales usados en las maquetas comercializadas son mejores y más duraderos que los obtenidos mediante impresión 3D, pero el precio juega en su contra, así como la disponibilidad en el menor tiempo posible. Aunque solo se ha podido recopilar datos sobre los precios de dos distribuidores de maquetas, conociendo las características de los productos ofrecidos por Edibon se puede llegar a estimar que el coste de los productos, de este último distribuidor, serán parecidos a los de la empresa Gunt.

Conociendo la información de los costes, tanto de las maquetas comercializadas como de las de fabricación autónoma, se puede llegar a la conclusión de que es mucho más económico adquirir maquetas autoproducidas. Por un precio aproximado de 122,41€ y 113,04€ se pueden obtener respectivamente las maquetas de los mecanismos cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón cuyos diseños se han mostrado antes en este trabajo. Mientras que, por otra parte, las maquetas comercializadas de estos mismos mecanismos se mueven entre 675 € y 1.701,94€, para el cuadrilátero articulado, y 600 € y 1.701,94€, para el mecanismo manivela-biela-pistón. Considerando también que los precios de las maquetas autoproducidas incluyen la motorización y control a diferencia de las comercializadas.

Otro punto importante que considerar en la fabricación autónoma de maquetas, dejando el coste de lado, es que el propio Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) puede imponer o elegir las dimensiones y la confección del mecanismo como más le guste. Es decir, que se va a conseguir un resultado final que será exactamente el que interesa. Otra ventaja de fabricar desde el propio DEM, es que aunque las piezas de PLA puedan tener menos durabilidad que otras piezas metálicas, es muy fácil obtener los recambios de éstas, produciéndolas cuando se requieran, a un bajo coste.



## 8. Impacto ambiental

El presente proyecto aporta recursos virtuales, diseños, estudio de las maquetas comercializadas y estudio de los costes de las maquetas didácticas para la enseñanza de Teoría de Maquinas y Mecanismos. Por lo tanto, al no materializar ningún prototipo se puede concluir que el impacto ambiental de este proyecto es bajo.

Aun así, a continuación, se realiza el estudio del impacto ambiental que conllevaría la fabricación de las maquetas diseñadas en este proyecto.

El primer aspecto que considerar en el impacto ambiental de las maquetas son los materiales usados para su fabricación, en su mayoría, metacrilato y PLA. El PLA es un polímero de procedencia vegetal (almidón de maíz), considerado sostenible por ser biodegradable y estar hecho de materias primas renovables. La huella de carbono de este material es de 0,5 kg CO<sub>2</sub>/kg PLA, notablemente inferior que las huellas de carbono de otros plásticos de origen fósil. [42]

Conociendo la cantidad de PLA necesaria para fabricar las maquetas (0,452 kg PLA), se puede calcular la huella de carbono de este producto.

$$0,452 \text{ kg PLA} \cdot \frac{0,5 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg PLA}} = 0,226 \text{ kg CO}_2$$

Es destacable que el uso de la tecnología de impresión 3D favorece el impacto ambiental del proceso de fabricación ya que, en comparación a otras alternativas de fabricación, tanto el gasto de material como el residuo generado es inferior.

Por otro lado, el metacrilato (PMMA) es un material termoplástico con muy buenas propiedades constructivas que destaca por su ligereza y resistencia. El PMMA a diferencia del PLA no es biodegradable y es difícil de reciclar por lo que su huella de carbono es de alrededor de 4,38 kg CO<sub>2</sub>/kg PMMA. [43]

$$2 \text{ DIN A3 PMMA} \cdot \frac{1247,4 \text{ cm}^3 \text{ PMMA}}{1 \text{ DIN A3 PMMA}} \cdot \frac{1,18 \text{ g PMMA}}{1 \text{ cm}^3 \text{ PMMA}} \cdot \frac{1 \text{ kg PMA}}{1000 \text{ g PMMA}} \cdot \frac{4,38 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg PMA}} = \\ = 12,894 \text{ kg CO}_2$$

Por último, también se tiene en cuenta el impacto ambiental de los motores utilizados para ambas maquetas. Para calcular el impacto ambiental de estos componentes se comparan los motores utilizados con el motor de un taladro doméstico, considerando que estos son de tamaño inferior. La huella de carbono de un motor de taladro doméstico es de 15 kg CO<sub>2</sub>/kg. [44]

$$2 \text{ motores} \cdot \frac{0.28 \text{ kg}}{1 \text{ motor}} \cdot \frac{15 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg}} = 8,4 \text{ kg CO}_2$$

Juntando los cálculos de la huella de carbono de estos elementos se puede estimar que la huella de carbono generada al materializar las maquetas es de unos **21,52 kg CO<sub>2</sub>**.

Aunque no se han considerado los demás componentes electrónicos, se puede considerar que se trata de un impacto ambiental pequeño para la fabricación de un producto, gracias al uso de la tecnología de impresión 3D con PLA.



## 9. Conclusiones

En el trabajo se cumplen los dos objetivos generales del mismo. Por una parte, se ha realizado el análisis de las características constructivas, funcionales y los costes de adquisición de maquetas comercializadas para la enseñanza de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM), en particular, por las firmas Guntt (Alemana) y TecQuipment (Inglesa); y por otra parte se han diseñado nuevas maquetas modulares de los mecanismos cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón, así como se ha propuesto los elementos electrónicos y el programa, que permitirán el control del funcionamiento de dichos mecanismos una vez materializados. Para la fabricación se aportan los archivos 3D de cada sólido creados en SolidWorks, así como la propuesta del material a utilizar (PLA para las piezas y Metacrilato para la bancada). Se dispone así, de nuevas maquetas virtuales y de su animación de funcionamiento, como recursos didácticos para la enseñanza-aprendizaje de la asignatura TMM.

Los objetivos específicos propuestos, también han sido logrados, lo que se fundamenta en los siguientes aspectos:

- Del análisis de los costes de las maquetas comercializadas, se concluye que los costes de adquisición son elevados; en el caso de un cuadrilátero articulado varía entre 675€ y 1701,94€, y entre 600 € y 1.701,94€, para el mecanismo manivela-biela-pistón, según la firma.
- Las nuevas maquetas diseñadas, con el fin de ser autoproducidas, tienen un coste de producción aproximado de unos 120 Euros, contando con la disponibilidad de máquinas de impresión 3D en el Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) y con la fabricación de corte por láser de las piezas de metacrilato, en una empresa de servicios como Servei Estació.
- Se presentan los diseños modulares de las maquetas cuadrilátero articulado y manivela-biela-pistón, que permiten el montaje y el funcionamiento de todas sus inversiones cinemáticas, utilizando una única bancada. Se han creado los videos de su funcionamiento que se aportan juntos con los archivos de Solidworks, para su futuro uso en la materialización de los mecanismos y el usos de las maqueta virtuales.p
- Se presenta la propuesta de motorización y control del funcionamiento de cada maqueta, sugiriéndose el uso de la placa Arduino UNO, de tarjetas de control BigEasyDriver, de motores paso a paso Nema17 y de fuentes de alimentación de 12 voltios y hasta 2 amperios de corriente. Se muestran los esquemas de las conexiones a realizar. Y se aporta también el código del programa Arduino, creado para el control del funcionamiento de dichos mecanismos.

Por último, se expone el coste de realización del proyecto, con un valor de 8.486,69 € y se expone el impacto ambiental, considerando éste como bajo.









## Agradecimiento

Se quiere agradecer especialmente al tutor del proyecto Enrique Ernesto Zayas Figueras por la dirección del proyecto, la confianza, la ayuda y el soporte constante a lo largo de estos últimos meses.

También se quiere agradecer al entorno más cercano al presente autor, tanto familia como amigos, que han colaborado también en este proyecto de forma más indirecta, pero igualmente importante, proporcionando apoyo.

Finalmente, se quiere agradecer también a las empresas que han facilitado los costes de las maquetas comercializadas, ya que han sido de gran importancia para este proyecto y también a la Universitat Politècnica de Catalunya por facilitar las licencias de estudiante de SolidWorks, programa con el que se han diseñado y creado los nuevos recursos virtuales.

## Bibliografia

- [1] Merino, D. (2018). *Recursos virtuales de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos*. Trabajo Final de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [2] Horas, C. (2019). *Recursos didácticos para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura "Teoría de Máquinas y Mecanismos". Prototipos virtuales y reales*. Trabajo Final de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [3] Costa, M. (2019). *Modelos virtuales de mecanismos de ruedas dentadas de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de la teoría de máquinas y mecanismos*. Trabajo Final de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [4] Garcia, A. (2019). *Diseño, fabricación, motorización y control de mecanismos diversos a utilizar como recursos didácticos en las asignaturas Teoría de Máquinas y Mecanismos y Proyecto II*. Trabajo Final de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [5] Bautista, M.G. et al. (2014). *El uso de material didáctico y las tecnologías de información y comunicación (TIC's) para mejorar el alcance académico*. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).
- [6] Zayas, E.E. et al. (2020). *Recursos virtuales para la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos en Ingeniería Mecánica*.
- [7] Català, P. et al. (2013). *Catalogació de maquetes per a la docència de Teoria de Màquines i Mecanismes*. Departament d'Enginyeria Mecànica (UPC).
- [8] Norton R. *Diseño de Maquinaria. Una introducción a la síntesis y análisis de mecanismos*. McGraw-Hill. México D.F, México (1995)
- [9] Cardona, S. y Clos, D. (2001). *Teoría de máquinas*. Ed. UPC
- [10] Zayas, E.E., Garcia, A. y Tejedo J.L. (2019). *Compendio de mecanismos modelados, animados y materializados mediante impresión 3D*. Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [11] Zayas, E.E. (2019). *Proyecto II: Diseño, materialización e implementación de mecanismos en una aplicación*. Curso 2018/2019 (Apuntes de la asignatura Proyecto II (36)). ETSEIB.UPC. pp. 130

- [12] Zayas, E.E. y Jordi, L. (2019). *Asignatura Proyecto II: integradora de conocimientos en el grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales*. Memorias del XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIBIM 2019, n. 18, pp. 372. Cartagena de Indias. Colombia.
- [13] Zayas, E. E. (2001). *Aportación al estudio de levas desmodrómicas*. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [14] G.U.N.T. Gerätebau GmbH. Engineering mechanics and engineering design. Dynamics. Kinematics.  
  
[\[https://www.gunt.de/index.php?option=com\\_gunt&task=gunt.list.category&lang=en&category\\_id=15&product\\_id=0\]](https://www.gunt.de/index.php?option=com_gunt&task=gunt.list.category&lang=en&category_id=15&product_id=0)
- [15] G.U.N.T. Gerätebau GmbH. Engineering mechanics and engineering design. Dynamics. Kinematics. Kinematic model: four-joint link (KI 130).  
  
[\[https://www.gunt.de/images/datasheet/956/KI-130-Kinematic-model-four-joint-link-gunt-956-pdf\\_1\\_en-GB.pdf\]](https://www.gunt.de/images/datasheet/956/KI-130-Kinematic-model-four-joint-link-gunt-956-pdf_1_en-GB.pdf)
- [16] TecQuipment Ltd. Engineering Science. Mechanisms.  
  
[\[https://www.tecquipment.com/engineering-science/mechanisms\]](https://www.tecquipment.com/engineering-science/mechanisms)
- [17] TecQuipment Ltd. Engineering Science. Mechanisms. Bar linkages kit (ES15).  
  
[\[https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES15-Bar-Linkages-Datasheet.pdf\]](https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES15-Bar-Linkages-Datasheet.pdf)
- [18] G.U.N.T. Gerätebau GmbH. Engineering mechanics and engineering design. Dynamics. Kinematics. Kinematic model: crank mechanism (KI 110).  
  
[\[https://www.gunt.de/images/datasheet/953/KI-110-Kinematic-model-crank-mechanism-gunt-953-pdf\\_1\\_en-GB.pdf\]](https://www.gunt.de/images/datasheet/953/KI-110-Kinematic-model-crank-mechanism-gunt-953-pdf_1_en-GB.pdf)
- [19] TecQuipment Ltd. Engineering Science. Mechanisms. Simple mechanisms kit (ES14).  
  
[\[https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES14-Simple-Mechanisms-Datasheet.pdf\]](https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES14-Simple-Mechanisms-Datasheet.pdf)
- [20] G.U.N.T. Gerätebau GmbH. Engineering mechanics and engineering design. Dynamics. Kinematics. Kinematic model: Whitworth quick return mechanism (KI 140).

[\[https://www.gunt.de/images/datasheet/957/KI-140-Kinematic-model-Whitworth-quick-return-mechanism-gunt-957-pdf\\_1\\_en-GB.pdf\]](https://www.gunt.de/images/datasheet/957/KI-140-Kinematic-model-Whitworth-quick-return-mechanism-gunt-957-pdf_1_en-GB.pdf)

- [21] TecQuipment Ltd. Engineering Science. Mechanisms. Additional mechanisms kit (ES18).

[\[https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES18-Additional-Mechanisms-Datasheet.pdf\]](https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES18-Additional-Mechanisms-Datasheet.pdf)

- [22] TecQuipment Ltd. Engineering Science. Mechanisms. Cam, crank and toggle kit (ES12).

[\[https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES12-Cam-Crank-Toggle-Datasheet.pdf\]](https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/ES12-Cam-Crank-Toggle-Datasheet.pdf)

- [23] EDIBON. Mecánica. Ingeniería mecánica. Máquinas simples. Mecanismos.

[\[https://www.edibon.com/es/mecanica/ingenieria-mecanica/maquinas-simples/mecanismos#Lista%20de%20productos\]](https://www.edibon.com/es/mecanica/ingenieria-mecanica/maquinas-simples/mecanismos#Lista%20de%20productos)

- [24] EDIBON. Mecánica. Ingeniería mecánica. Máquinas simples. Mecanismos. Mecanismo de retorno rápido de Whitworth (MBM2).

[\[https://www.edibon.com/es/mecanismo-de-retorno-rapido-de-whitworth\]](https://www.edibon.com/es/mecanismo-de-retorno-rapido-de-whitworth)

- [25] LJ Ceate. Programas. Ingeniería. Equipos Mecánicos.

[\[https://www.ljcreate.com/es/programas/ingenieria/equipos-mecanicos\]](https://www.ljcreate.com/es/programas/ingenieria/equipos-mecanicos)

- [26] LJ Ceate. Programas. Ingeniería. Equipos Mecánicos. Entrenador de mecanismos.

[\[https://www.ljcreate.com/es/programas/ingenieria/equipos-mecanicos/252/entrenador-de-mecanismos-detail\]](https://www.ljcreate.com/es/programas/ingenieria/equipos-mecanicos/252/entrenador-de-mecanismos-detail)

- [27] Servei Estació. Iman Neodimio Cuad.

[\[https://serveiestacio.com/es/iman-neodimio-cuad-0-3x0-7x0-2cm-fuerza-0-89-kg-20u.html\]](https://serveiestacio.com/es/iman-neodimio-cuad-0-3x0-7x0-2cm-fuerza-0-89-kg-20u.html)

- [28] Vivancos, J., Buj, I. et al. *Sistemas de Fabricación*. Departamento de Ingeniería Mecánica. UPC

- [29] Fuyu. *¿Cuál es la diferencia entre el servo y motores paso a paso?*

- [\[https://www.fuyumotion.com/es/news/whats-the-difference-between-servo-and-stepper-motors\]](https://www.fuyumotion.com/es/news/whats-the-difference-between-servo-and-stepper-motors)
- [30] HTA3D. Motor paso a paso Nema 17. 17HS4401.  
[\[https://www.hta3d.com/es/motor-paso-a-paso-nema-17-17hs4401-eje-5mm-en-d\]](https://www.hta3d.com/es/motor-paso-a-paso-nema-17-17hs4401-eje-5mm-en-d)
- [31] Schmalz Haus LLC.  
[\[https://www.schmalzhaus.com/\]](https://www.schmalzhaus.com/)
- [32] Arduino. Arduino UNO Rev3.  
[\[https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3\]](https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3)
- [33] Librería AccelStepper  
[\[http://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/AccelStepper-1.61.zip\]](http://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/AccelStepper-1.61.zip)
- [34] Fritzing  
[\[https://fritzing.org/download/\]](https://fritzing.org/download/)
- [35] GitHub. Fritzing Parts. BigEasyDriver.  
[\[https://github.com/sparkfun/Fritzing\\_Parts/blob/master/products/12859\\_big\\_easy\\_driver.fzpz\]](https://github.com/sparkfun/Fritzing_Parts/blob/master/products/12859_big_easy_driver.fzpz)
- [36] Amazon. Coste PLA.  
[\[https://www.amazon.es/Geeetech-Filament-Filamento-Reliable-Printing/dp/B01MR5OCX5/ref=zg\\_bs\\_6684364031\\_2?\\_encoding=UTF8&psc=1&efRID=NEFADNQQ6VWBPSE12GYY\]](https://www.amazon.es/Geeetech-Filament-Filamento-Reliable-Printing/dp/B01MR5OCX5/ref=zg_bs_6684364031_2?_encoding=UTF8&psc=1&efRID=NEFADNQQ6VWBPSE12GYY)
- [37] Bricogreek. Coste BigEasyDriver.  
[\[https://tienda.bricogeek.com/controladores-motores/404-big-easy-driver.html\]](https://tienda.bricogeek.com/controladores-motores/404-big-easy-driver.html)
- [38] Amazon. Coste fuente de corriente externa.  
[\[https://www.amazon.es/Transformador-alimentacion-Controlador-regulado-alimentaci%C3%B3n/dp/B07RFG5GC1/ref=sr\\_1\\_8?\\_mk\\_es\\_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=fuente+de+alimentacion+12V&qid=1603730346&sr=8-8\]](https://www.amazon.es/Transformador-alimentacion-Controlador-regulado-alimentaci%C3%B3n/dp/B07RFG5GC1/ref=sr_1_8?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=fuente+de+alimentacion+12V&qid=1603730346&sr=8-8)

- [39] Rs Online. Coste potenciómetro.

[[https://es.rs-online.com/web/p/potenciometros/2633034?cm\\_mmc=ES-PLA-DS3A--google--PLA\\_ES\\_ES\\_Componentes\\_Pasivos\\_Whoop--\(ES:Whoop!\)+Potenci%C3%B3metros--2633034&matchtype=&pla-336227843725&qclid=Cj0KCQjw59n8BRD2ARIsAAmgPmKZsc4PArdueIOik7KqHsTy8VSY\\_2RmJxEm5nOt2cii3At5NMUAO5UaAiqsEALw\\_wcB&qclsrc=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/potenciometros/2633034?cm_mmc=ES-PLA-DS3A--google--PLA_ES_ES_Componentes_Pasivos_Whoop--(ES:Whoop!)+Potenci%C3%B3metros--2633034&matchtype=&pla-336227843725&qclid=Cj0KCQjw59n8BRD2ARIsAAmgPmKZsc4PArdueIOik7KqHsTy8VSY_2RmJxEm5nOt2cii3At5NMUAO5UaAiqsEALw_wcB&qclsrc=aw.ds)]

- [40] Servei Estació. Materiales. Plancha de Metacrilato Transparente Cristal.

[<https://serveiestacio.com/es/plancha-de-metacrilato-transparente-cristal.html>]

- [41] Amazon. Coste Tornillos

[[https://www.amazon.es/Tornillo-Tuerca-Inoxidable-Mecanico-Avellanada/dp/B07TZF5TYL/ref=sr\\_1\\_1\\_sspa?mk\\_es\\_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=M4%2Bcabeza%2Bavellanda&qid=1603103739&s=tools&sr=1-1-spons&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFBOU9MNUpJNFhKQkgmZW5jcnlwdGVkSWQ9QTAzMdIyNThtaOTBVsjFNUktFQlYmZW5jcnlwdGVkQWRJZD1BMDIzMTIyNjNGNkhHMIVWVFMxNzkmd2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGYmYWN0aW9uPWNsaWNrUmVkaXJlY3QmZG9Ob3RMb2dDbGljaz10cnVI&th=1](https://www.amazon.es/Tornillo-Tuerca-Inoxidable-Mecanico-Avellanada/dp/B07TZF5TYL/ref=sr_1_1_sspa?mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=M4%2Bcabeza%2Bavellanda&qid=1603103739&s=tools&sr=1-1-spons&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFBOU9MNUpJNFhKQkgmZW5jcnlwdGVkSWQ9QTAzMdIyNThtaOTBVsjFNUktFQlYmZW5jcnlwdGVkQWRJZD1BMDIzMTIyNjNGNkhHMIVWVFMxNzkmd2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGYmYWN0aW9uPWNsaWNrUmVkaXJlY3QmZG9Ob3RMb2dDbGljaz10cnVI&th=1)]

- [42] Espino, S., & Font, D. *Los bioplásticos, nuevos materiales para un futuro más sostenible*. Ecros.

- [43] (2015). *Poly methyl methacrylate (PMMA): Eco-profiles and Environmental Product of the European Plastics Manufacturers*.

[<https://www.petrochemistry.eu/wp-content/uploads/2018/01/PMMA-Eco-profile-EPD-1-15-1.pdf>]

- [44] Sostenible, Generalitat de Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament. (2008). *Calculadora de carboni. Una guia d'acció contra el canvi climàtic*.